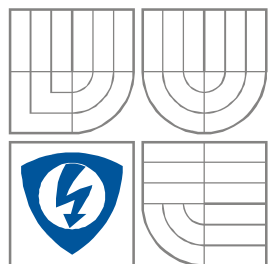


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ**
ÚSTAV RADIOELEKTRONIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF RADIO ELECTRONICS

Modelování antén letounu VUT 100

MODELING ANTENNAS OF THE VUT 100 AIRCRAFT

SEMESTRÁLNÍ PROJEKT
MASTER'S PROJECT

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. Vladimír Starý

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

BRNO, 2009

LICENČNÍ SMLOUVA

POSKYTOVANÁ K VÝKONU PRÁVA UŽÍT ŠKOLNÍ DÍLO

uzavřená mezi smluvními stranami:

1. Pan/paní

Jméno a příjmení: Bc. Vladimír Starý
Bytem: Radlín 11, Heřmanův Městec, 538 03
Narozen/a (datum a místo): 17. ledna 1985 v Chrudimi

(dále jen „autor“)

a

2. Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií
se sídlem Údolní 53, Brno, 602 00
jejímž jménem jedná na základě písemného pověření děkanem fakulty:
prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida, předseda rady oboru Elektronika a sdělovací technika
(dále jen „nabyvatel“)

Čl. 1

Specifikace školního díla

1. Předmětem této smlouvy je vysokoškolská kvalifikační práce (VŠKP):

- ☐ disertační práce
 - ☒ diplomová práce
 - ☐ bakalářská práce
 - ☐ jiná práce, jejíž druh je specifikován jako
- (dále jen VŠKP nebo dílo)

Název VŠKP: Modelování antén letounu VUT 100

Vedoucí/ školitel VŠKP: prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida

Ústav: Ústav radioelektroniky

Datum obhajoby VŠKP: _____

VŠKP odevzdal autor nabyvateli*:

- ☒ v tištěné formě – počet exemplářů: 2
- ☒ v elektronické formě – počet exemplářů: 2

2. Autor prohlašuje, že vytvořil samostatnou vlastní tvůrčí činností dílo shora popsané a specifikované. Autor dále prohlašuje, že při zpracovávání díla se sám nedostal do rozporu s autorským zákonem a předpisy souvisejícími a že je dílo dílem původním.
3. Dílo je chráněno jako dílo dle autorského zákona v platném znění.
4. Autor potvrzuje, že listinná a elektronická verze díla je identická.

* hodící se zaškrtněte

Článek 2

Udělení licenčního oprávnění

1. Autor touto smlouvou poskytuje nabyvateli oprávnění (licenci) k výkonu práva uvedené dílo nevýdělečně užít, archivovat a zpřístupnit ke studijním, výukovým a výzkumným účelům včetně pořizování výpisů, opisů a rozmnoženin.
2. Licence je poskytována celosvětově, pro celou dobu trvání autorských a majetkových práv k dílu.
3. Autor souhlasí se zveřejněním díla v databázi přístupné v mezinárodní síti
 - ☒ ihned po uzavření této smlouvy
 - ☐ 1 rok po uzavření této smlouvy
 - ☐ 3 roky po uzavření této smlouvy
 - ☐ 5 let po uzavření této smlouvy
 - ☐ 10 let po uzavření této smlouvy(z důvodu utajení v něm obsažených informací)
4. Nevýdělečné zveřejňování díla nabyvatelem v souladu s ustanovením § 47b zákona č. 111/ 1998 Sb., v platném znění, nevyžaduje licenci a nabyvatel je k němu povinen a oprávněn ze zákona.

Článek 3

Závěrečná ustanovení

1. Smlouva je sepsána ve třech vyhotoveních s platností originálu, přičemž po jednom vyhotovení obdrží autor a nabyvatel, další vyhotovení je vloženo do VŠKP.
2. Vztahy mezi smluvními stranami vzniklé a neupravené touto smlouvou se řídí autorským zákonem, občanským zákoníkem, vysokoškolským zákonem, zákonem o archivnictví, v platném znění a popř. dalšími právními předpisy.
3. Licenční smlouva byla uzavřena na základě svobodné a pravé vůle smluvních stran, s plným porozuměním jejímu textu i důsledkům, nikoliv v tísní a za nápadně nevýhodných podmínek.
4. Licenční smlouva nabývá platnosti a účinnosti dnem jejího podpisu oběma smluvními stranami.

V Brně dne: 29. května 2009

.....
Nabyvatel

.....
Autor

ABSTRAKT

Cílem práce bylo prostudovat parametry antén a navrhnout strukturu programu, který poslouží k modelování vyzařování antén, jimiž je vybaven letoun VUT 100. V první části semestrální práce byly antény rozděleny podle kmitočtových pásem, v nichž pracují, a podle jejich polarizace. Druhá část práce se zabývá návrhem programu v prostředí MATLAB, který počítá směrové charakteristiky antén v závislosti na kmitočtu a na umístění jednotlivých antén na trupu letounu. V poslední části byl vytvořen optimalizační algoritmus, který mění pozice jednotlivých antén tak, aby byly splněny požadavky výrobce letounu.

KLÍČOVÁ SLOVA

Letoun VUT 100, modelování antén, polarizace antén, vzájemné působení antén, obecně orientovaný vodič, soustava antén, optimalizace antén, metoda roje částic, genetické algoritmy, decimace populace, vítězství v turnaji.

ABSTRACT

The thesis is aimed to analyze parameters of antennas, and work out the computer, which can be used to the modeling of the radiation of antennas of the VUT 100 aircraft. First, used antennas are divided according to the operation frequencies, and the polarization. Second, a MATLAB program is developed and described. The program computes radiation patterns at different frequencies for the different location of antennas on the VUT aircraft. Finally, the MATLAB optimization program is develop and described. The program changes the position of antennas so that the requirements of aircraft producer can be met.

KEYWORDS

VUT 100 aircraft, antenna modeling, antenna polarization, interaction of antennas, generally oriented wire, antenna array, optimization of antennas, particle swarm optimization, genetic algorithms, population decimation, tournament selection.

Bibliografická citace:

STARÝ, V. *Modelování antén letounu VUT 100*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2009. 49 s. Vedoucí semestrální práce prof. Dr. Ing. Zbyněk Raida.

Prohlášení

Prohlašuji, že svou diplomovou práci na téma Modelování antén letounu VUT 100 jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucího diplomové práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené diplomové práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této diplomové práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu diplomové práce Prof. Dr. Ing. Zbyňku Raidovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé diplomové práce.

V Brně dne 29. května 2009

.....
podpis autora

OBSAH

1 Úvod	8
2 Vyzařování elektromagnetických vln	10
2.1 Záření lineárních antén	10
2.2 Technický výpočet záření antén	11
3 Soustava obecně orientovaných antén	15
3.1 Výpočet funkce záření pomocí vektorového vztahu	15
3.2 Výpočet funkce záření pomocí skalárního vztahu	18
4 Optimalizace	21
4.1. Particle Swarm Optimization(PSO)	21
4.2. Genetické algoritmy(GA)	24
4.3. Podmínky optimalizace	26
4.4. Algoritmus PSO v programu Matlab	28
4.5. Popis GA v programu Matlab	30
5 Porovnání výsledků	33
5.1 Soustava antén na kmitočtu 121,5 MHz	33
5.1.1. Optimalizace metodou roje částic	34
5.1.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů	35
5.2. Soustava antén na kmitočtu 243MHz	38
5.2.1. Optimalizace metodou roje částic	39
5.2.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů	39
5.3. Soustava antén na kmitočtu 1030MHz	41
5.3.1. Optimalizace metodou roje částic	41
5.3.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů	42
6 Závěr	47
Literatura	48
Seznam použitých zkratk a symbolů	49

1 Úvod

V současné době má výroba malých osobních letadel vzrůstající tendenci. Zájem o ultra-lehká (*Ultralight*) a lehká sportovní letadla (*Light Sport Aircraft*) totiž obrovsky narůstá.

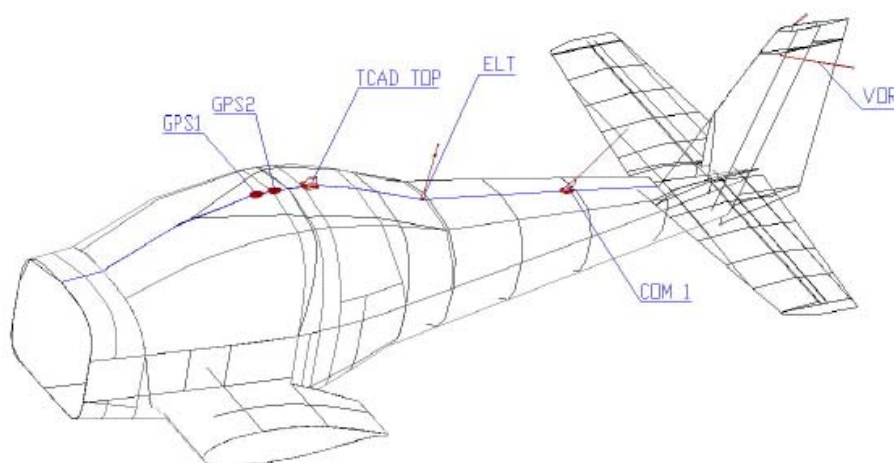
Letadla jsou soustavně modernizována – jsou vybavována nejmodernější avionikou, zvyšuje se jejich životnost, bezpečnost provozu, prodlužuje se jejich dolet, používají se stále novější technologie, využívá se kompozitních materiálů.

Použití kompozitních materiálů však přináší problém s řešením pronikání elektromagnetického rušení dovnitř letadla a s případným ovlivněním jeho avioniky. Veškeré instalované elektrické, elektronické a elektromechanické zařízení letadla včetně vnějšího vybavení musí být navrženo tak, aby splňovalo příslušné požadavky na elektromagnetické rušení a elektromagnetickou odolnost. Letadlové systémy, anténní systémy a vybavení musí být elektricky propojeny takovým způsobem, aby nebyl snížen jejich požadovaný výkon a narušena jejich funkce.

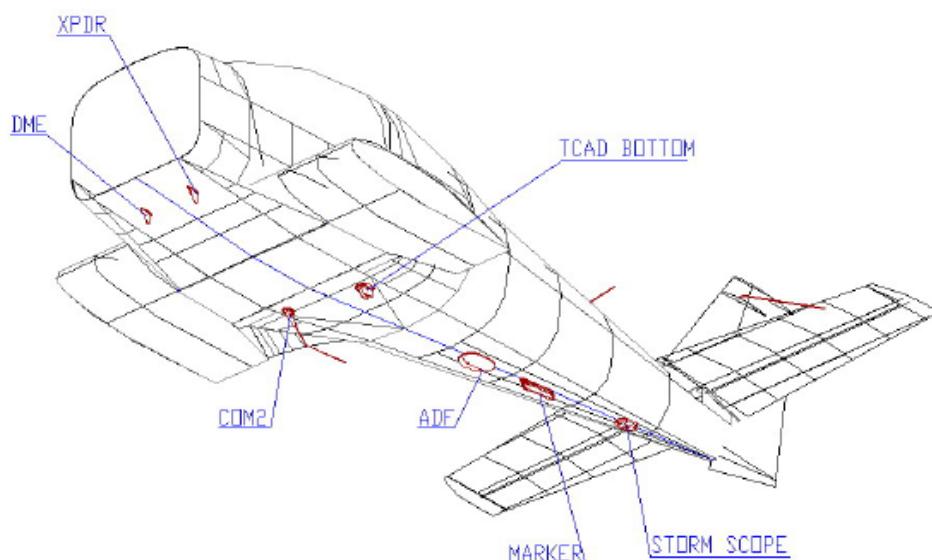
Jelikož vybavení letounu moderní avionikou vyžaduje rozmístění spousty antén po trupu letounu, lze obtížně splnit doporučení výrobců pro optimální rozmístění antén. U VUT 100, EV-55 a ostatních ultra-lehkých a lehkých letounů je rozmístění dvanácti a více antén v podstatě kompromisem.

Nemalou pozornost proto zasluhuje prozkoumání vzájemného působení antén, které pracují ve stejném kmitočtovém pásmu. Výsledná intenzita elektrického pole je dána součtem příspěvků od jednotlivých antén a směrové vlastnosti „celé soustavy“ antén se mohou tedy poněkud lišit.

Na obr. 1 je zobrazeno rozmístění antén na potahu letounu VUT 100. My se pokusíme namodelovat vzájemné ovlivňování těchto antén vlastním skriptem v programu Matlab. Obrázky letounu a tabulka jsou převzaty z [3].



Obr. 1a Rozmístění antén na horní části trupu letadla VUT 100.



Obr. 1b Rozmístění antén na spodní části trupu letadla VUT 100.

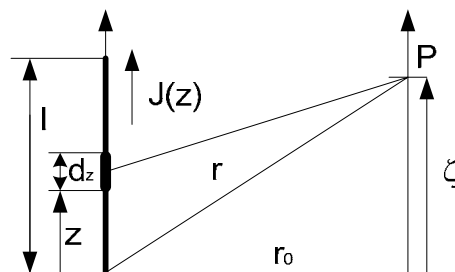
Tab. 1 Popis antén umístěných na trupu letadla VUT 100.

označení v Obr. 1	anténa	pracovní pásmo [MHz]	polarizace
ADF	Honeywell KA 0044B	0,2÷1,8 (příjem)	
COM1	Comant CI292-1	118÷137 (příjem i vysílání)	Vertikální
COM2	Comant CI292-2	118÷137 (příjem i vysílání)	Vertikální
DME	Honeywell KA 60	960÷1220 (příjem i vysílání)	Vertikální
XPDR(DME)	Comant CI 105	1030 (příjem) a 1090 (vysílání)	
ELT	ACK Technologies P/N E-0115	121,5 a 243 (vysílání)	Vertikální
ELT	Artex P/N 110 338	121,5 a 406 (vysílání)	Vertikální
GPS	Garmin Ga56	1575,42 ± 2,0(příjem)	Kruhová- pravotočivá
MARKER	Comant CI 118	75 (příjem)	Paralelně s montážní základnou
Storm Scope	BF Goodrich NY-163	0,01÷100 (příjem)	
TCAD top	Avidyne P/N S72-1750-31L	1090 (příjem)	Vertikální k potahu letounu
TCAD bottom	Avidyne P/N S72-1750-32L	1090 (příjem)	Vertikální k potahu letounu
VOR	Démant CI157P	108÷118 (VOR/LOC) (příjem) 329÷335 (G/S) (příjem)	Horizontální

2 Vyzařování elektromagnetických vln

2.1 Záření lineárních antén

Lineární anténu si lze představit jako soubor elementárních dipólů. Intenzita pole v každém bodě prostoru je rovna součtu příspěvků od jednotlivých elementárních dipólů. V místě příjmu dochází k interferencím tohoto vlnění, takže některé příspěvky se mohou vlivem různých dráhových posuvů (a tím různých fázových posuvů) sečíst nebo odečíst. K odečtení příspěvků dojde v případě, když fázový posuv interferujících vln je roven π radiánů, což odpovídá rozdílu posuvu vln o polovinu délky vlny.



Obr. 2 Záření lineární antény [2]

Na obr. 2 je nakreslena lineární anténa délky l . Anténa leží v ose z a je pozorována z bodu P . Při výpočtu intenzity pole v bodě P je vhodné úlohu rozdělit do dvou oblastí:

- Bod P je tak blízko, že jednotlivé vzdálenosti $r(z)$ se podstatně liší. Zde se intenzita pole počítá pomocí vektorového potenciálu. Zde se popsaným případem detailně zabývat nebudeme.
- Bod P je tak daleko, že délka antény je velmi malá vůči vzdálenosti r_0 , tedy $l \ll r_0$. Anténa tedy bezpečně leží v oblasti záření. Příspěvek jednotlivých elementů k intenzitě pole v bodě P je pak dán vztahem [1]

$$E^{(P)} = \int_0^l 60 J(z) \cdot j \cdot \frac{k}{2} \sin(\vartheta) dz \frac{e^{-j \cdot k \cdot r(z, \zeta)}}{r(z, \zeta)}, \quad (1)$$

kde l je délka antény, $J(z)$ je proud elementu dz , k značí vlnové číslo, úhel ϑ svírá osa antény se spojnicí elementu dz s bodem pozorování P a souřadnicemi r_0 a ζ je určen bod pozorování P .

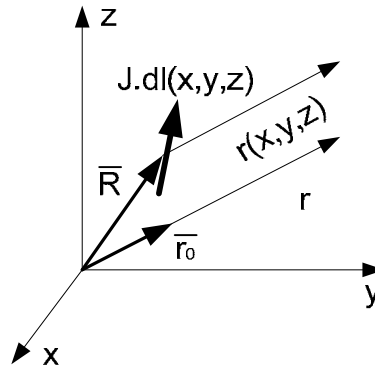
Pro vyřešení integrálu (1) jsou nutná určitá zjednodušení. Pro vzdálenou (Fraunhoferovu) oblast tato zjednodušení vedou na vztah pro výpočet intenzity vyzařovaného pole ve tvaru [1]

$$E(\vartheta) = 60 \cdot j \cdot \frac{k}{2} \cdot \sin(\vartheta) \cdot \int_0^l J(z) \cdot e^{j \cdot k \cdot z \cdot \cos \vartheta} dz \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r}}{r}, \quad (2)$$

kde k je vlnové číslo, úhel ν svírá osa antény se spojnicí elementu dz s bodem pozorování P , $J(z)$ je proud elementu dz , z určuje vzdálenost elementu od počátku soustavy souřadnic, souřadnicemi r_0 a ζ je určen bod pozorování P .

2.2 Technický výpočet záření antén

Při výpočtu budeme předpokládat, že bod pozorování je ve Fraunhoferově oblasti a v okolí antény je vakuum (vzduch). Počítat budeme funkci záření obecně orientovaného vodiče. Směrové charakteristiky antény zobrazíme v kartézských a polárních souřadnicích. Budeme měnit parametry antény a pozorovat vliv těchto změn směrové charakteristiky. Výpočet bude proveden skriptem v programu MATLAB.



Obr. 3. Obecně orientovaný vodič (podle [2])

Pro výpočet záření obecně orientovaných antén lze využít vektorového počtu. Na obr. 3. je nakreslen jeden z elementů obecně orientované antény. Bod pozorování P je ve vzdálenosti r , směr k němu udává jednotkový vektor \bar{r}_0 , polohu elementu udává vektor \bar{R} , a jeho orientaci vektor \bar{dl} . Příspěvek elementu k intenzitě elektrického pole v bodě P je dán vztahem [2]

$$d\bar{E} = 60 \cdot J \cdot j \cdot \frac{k}{2} \cdot (\bar{dl} \times \bar{r}_0) \times \bar{r}_0 \cdot \frac{e^{-j \cdot k \cdot r(x,y,z)}}{r}, \quad (3)$$

vzdálenost v exponentu je dána vztahem

$$r(x, y, z) = r - \bar{R} \cdot \bar{r}_0,$$

a zbytek symbolů má stejný význam jako v předešlém. Funkce záření takovéto antény je pak dána vztahem [2]

$$F = J \cdot k \cdot (\bar{dl} \times \bar{r}_0) \times \bar{r}_0 \cdot e^{-j \cdot k \cdot \bar{r} \cdot \bar{R}_0}, \quad (4)$$

Program `obecne_orientovany_vodic.m` pro výpočet záření antény počítá funkci záření pro úhel $\vartheta \in \langle -90^\circ; +90^\circ \rangle$. Program vykreslí polovinu charakteristiky, druhá polovina je souměrná podle osy y . Vektorový výpočet musí postupně proběhnout pro jednotlivé úhly ϑ . Z příslušných složek vektoru funkce záření pak získáme hodnotu výsledné funkce záření.

Postup výpočtu by měl být zřejmý z jednotlivých komentářů. Přesto je zde uvedeno malé vysvětlení. Pokud chceme mít anténu v ose x , nastavíme parametr x vektoru \bar{dl} na nenulovou hodnotu, např. na 1. Ostatní dvě složky y, z musí být nulové. Analogicky umístíme anténu do zbývajících dvou os y, z kartézského souřadného systému.

```

c=3e8; %rychlost svetla
f=200e6; %budici frekvence
lam=c/f; %vlnova delka
k=2*pi/lam; %vlnove cislo
theta=-90:90; %zmena uhlu theta
phi=0*pi/180; %velikost uhlu phi

for i=1:181
    r=1; %vzdalenost bodu pozorovani
    dL(1,:)= [0,0,1]; %orientace vektoru dL[x,y,z]
    thetar=theta(i)*pi/180; %prevedeni uhlu theta na radiany
    r0=[r*(sin(thetar)*cos(phi)),r*(sin(thetar)*sin(phi)),r*(cos(thetar))];
    dR(1,:)= [0,0,0]; %poloha vektoru-fazovy stred dipolu
    product=cross(dL(1,:),r0); %vektorovy soucin dl x r0
    PRODUCT=cross(product,r0); %vektorovy soucin (dl x r0) x r0
    F(1)=k*PRODUCT(1)*exp(-j*k*r0(1)*dR(1)); %funkce zarení
    F(2)=k*PRODUCT(2)*exp(-j*k*r0(2)*dR(2));
    F(3)=k*PRODUCT(3)*exp(-j*k*r0(3)*dR(3));
    dF(1,3*i-2)=F(1); %ulozeni slozky x funkce zarení
    dF(1,3*i-1)=F(2); %ulozeni slozky y funkce zarení
    dF(1,3*i)=F(3); %ulozeni slozky z funkce zarení
end

```

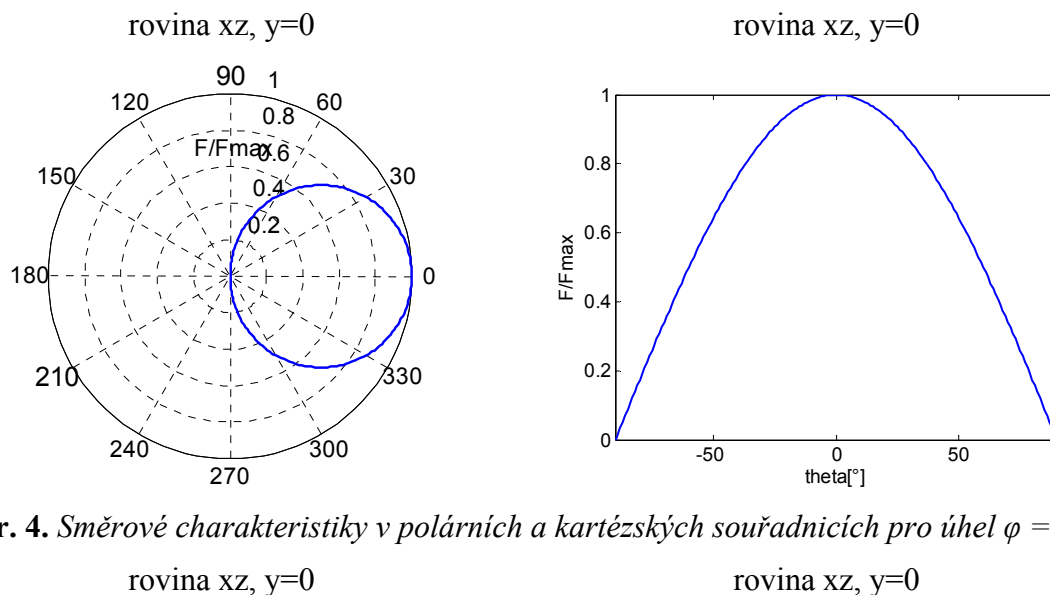
Zobrazení směrových charakteristik je popsáno v druhé části skriptu (viz níže). Program vypíše podle nastavení uživatele vektoru \mathbf{dL} a velikosti úhlu φ (0° nebo 90°), o kterou rovinu (xz, yz) se jedná. Filozofie programu by měla být zřejmá z následujícího výpisu. Nejdříve se testují vstupní parametry, poté se funkce záření normuje a vykreslí v kartézských a polárních souřadnicích:

```

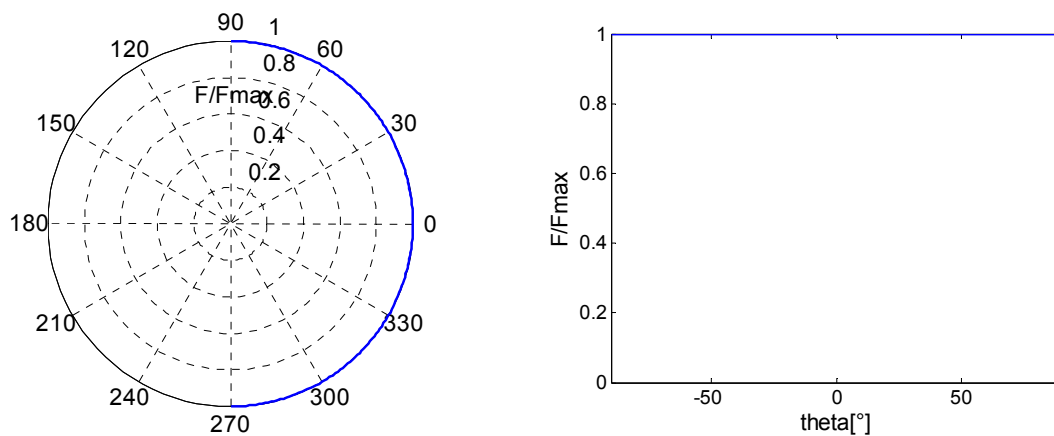
if (phi==0 | phi==90 && dL(1)==0 && dL(2)==0 && dL(3)~=0)
    figure;
    dFf=dFf/max(dFf);
    polar(THETAR, dFf, 'b');
    text(-0.2, 0.7, 'F/Fmax');
    title('Rovina xz, yz ');
    plot(theta, dFf);
    axis([-90 90 0 1]);
    xlabel('theta[°]');
    ylabel('F/Fmax');
    ...
end

```

Pro anténu v ose x při úhlu $\varphi = 0^\circ$ a $\varphi = 90^\circ$ vypadají směrové charakteristiky následovně:

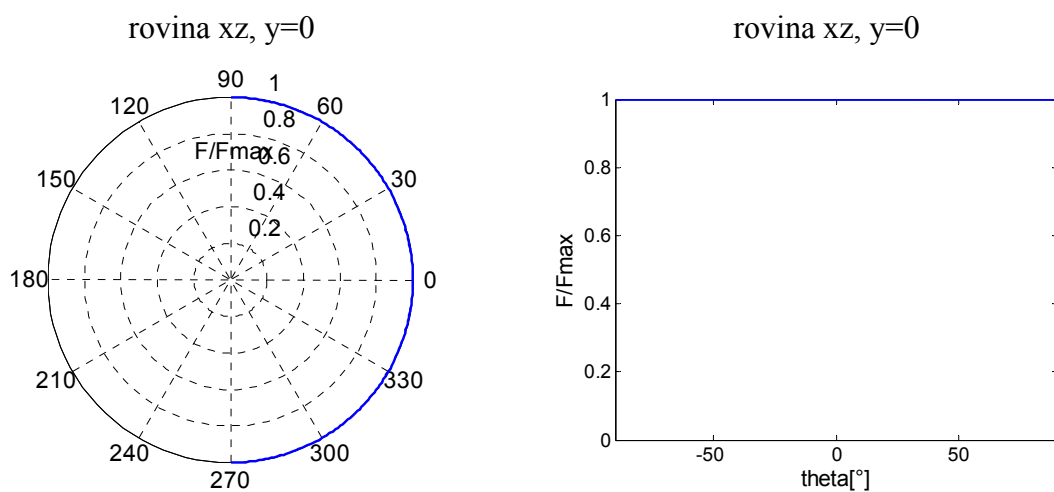


Obr. 4. Směrové charakteristiky v polárních a kartézských souřadnicích pro úhel $\varphi = 0^\circ$.

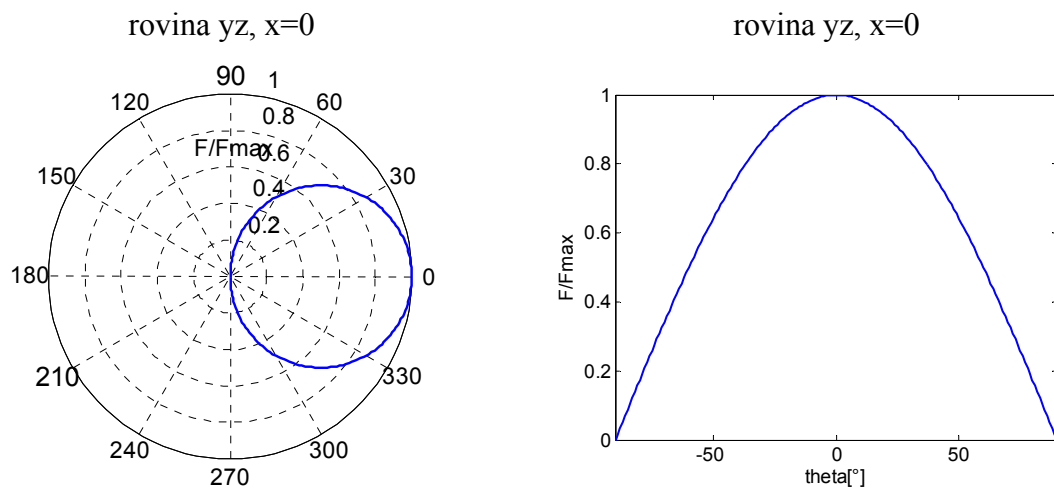


Obr. 5. Směrové charakteristiky v polárních a kartézských souřadnicích pro $\varphi = 90^\circ$.

Směrové charakteristiky pro anténu umístěnou do osy y pro úhly $\varphi = 0^\circ$ a $\varphi = 90^\circ$ následují.

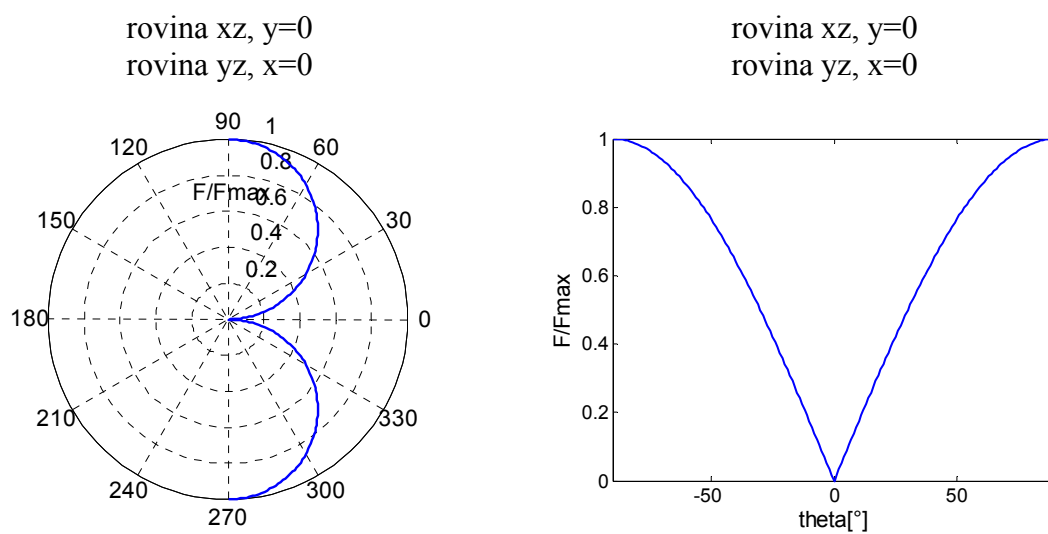


Obr. 6. Směrové charakteristiky v polárních a kartézských souřadnicích pro $\varphi = 0^\circ$.



Obr. 7. Směrové charakteristiky v polárních a kartézských souřadnicích pro $\varphi = 90^\circ$.

Směrové charakteristiky pro anténu umístěnou do osy z jsou pro úhly $\varphi = 0^\circ$ a $\varphi = 90^\circ$ stejné. Funkce záření na tomto úhlu nezáleží.



Obr. 8. Směrové charakteristiky obecně orientovaného vodiče v polárních a kartézských souřadnicích pro $\varphi = 0$ a $\varphi = 90^\circ$.

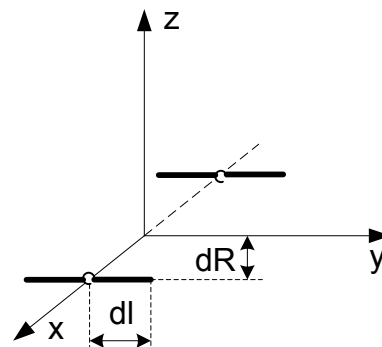
3 Soustava obecně orientovaných antén

Antény se většinou skládají do anténních soustav pro zlepšení parametrů. Vhodným uspořádáním anténních elementů lze zvětšit zisk nebo směrovost, popřípadě snížit úroveň bočních laloků. Vhodným buzením prvků soustavy lze měnit vyzářovací diagram podle požadavků.

3.1 Výpočet funkce záření pomocí vektorového vztahu

Prvky anténní soustavy jsou určeny souřadnicemi x, y, z vektoru \mathbf{dl} , který určuje orientaci anténního prvku, a vektoru \mathbf{dR} , který určuje fázový střed dipólu.

Pro výpočet funkce záření anténní soustavy využijeme vztahu pro výpočet funkce záření obecně orientovaného vodiče (4). Pokud bude vektor $\mathbf{dl} = [0, 1, 0]$, bude dipól umístěn rovnoběžně s osou y (obr. 9).



Obr. 9. Soustava dipólů v ose x

V programu MATLAB nejprve vytvoříme skript `prvnivodic.m`, který bude počítat funkci záření dipólu v závislosti na změně úhlu ϑ pro zadanou orientaci dipólu \mathbf{dL} a fázový střed dipólu \mathbf{dR} . Pro $\mathbf{dL} = [0, 1, 0]$ a $\mathbf{dR} = [\lambda/4, 0, 0]$ program vypadá následovně:

```
function [dF]=prvnivodic(f,phi,lam)

k=2*pi/lam;                               %vlnove cislo
theta=-90:90;                             %zmena uhlu theta

for i=1:181
    dL(1,:)= [0,1,0];                     %orientace dipolu
    r=sqrt(dL(1)^2+ dL(2)^2+ dL(3)^2);     %pruvodic r k bodu pozorovani
    thetar=theta(i)*pi/180;                %prevedeni uhlu theta na radiany
    phir=phi*pi/180;                       %prevedeni uhlu phi na radiany
    R(1,:)= [lam/4,0,0];                   %poloha vektoru-fazovy stred dipolu
    r0=[r*(sin(thetar)*cos(phir)),r*(sin(thetar)*sin(phir)),r*(cos(thetar))];
    product=cross(dL,r0);                  %vektorovy soucin dl x r0
    PRODUCT=cross(product,r0);              %vektorovy soucin (dl x r0) x r0
    F(1)=k*PRODUCT(1)*exp(-j*k*r0(1)*R(1)); %funkce zareni
    F(2)=k*PRODUCT(2)*exp(-j*k*r0(2)*R(2));
    F(3)=k*PRODUCT(3)*exp(-j*k*r0(3)*R(3));
    dF(1,3*i-2)=F(1);                     %ulozeni slozky x funkce zareni
    dF(1,3*i-1)=F(2);                     %ulozeni slozky y funkce zareni
    dF(1,3*i)=F(3);                       %ulozeni slozky z funkce zareni
end
```

Pro výpočet funkce záření druhého dipólu použijeme stejný program, pouze změníme vektor $\mathbf{dR} = [-\lambda/4, 0, 0]$. Výsledná funkce záření bude dána součtem jednotlivých složek funkcí záření F_x, F_y, F_z prvního a druhého dipólu. Program pro výpočet výsledné funkce záření vypadá takto:

```
c=3e8; %rychlost svetla
f=121.5e6; %frekvence 1. dipolu
f2=121.5e6; %frekvence 2. dipolu
lam=c/f; %vlnova delka 1. dipolu
lam2=c/f2; %vlnova delka 2. dipolu
phi=90;phi2=90; %velikost uhlu phi pro 1. a 2. dipol
dF=prvnivodic(f,phi,lam) %volani funkce zareni 1. dipolu
dF2=druhyvodic(f2,phi2,lam) %volani funkce zareni 2. dipolu

for i=1:181
    dFxvysledna(1,i)=dF(1,3*i-2); %vysledna slozka funkce zareni x
    dFyvysledna(1,i)=dF(1,3*i-1); %vysledna slozka funkce zareni y
    dFzvysledna(1,i)=dF(1,3*i); %vysledna slozka funkce zareni z
    dF2xvysledna(2,i)=dF2(1,3*i-2); %vysledna slozka funkce zareni x
    dF2yvysledna(2,i)=dF2(1,3*i-1); %vysledna slozka funkce zareni y
    dF2zvysledna(2,i)=dF2(1,3*i); %vysledna slozka funkce zareni z

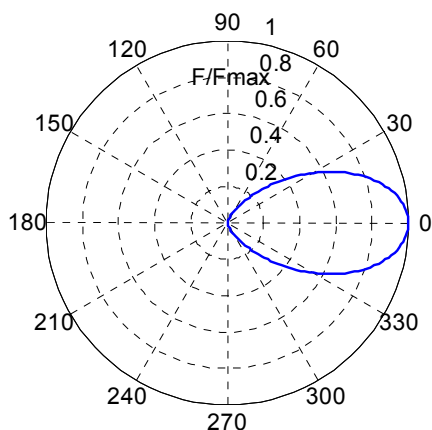
    dFcelkova(1,i)=sqrt((dFxvysledna(1,i)^2)+(dFyvysledna(1,i)^2)+(dFzvysledna(1,i)^2));
    dF2celkova(2,i)=sqrt((dF2xvysledna(2,i)^2)+(dF2yvysledna(2,i)^2)+(dF2zvysledna(2,i)^2));
end

dFcelk=dFcelkova(1,:)+dF2celkova(2,:);
dFxvysledna=dFxvysledna(1,:)+dF2xvysledna(2,:);
dFyvysledna=dFyvysledna(1,:)+dF2yvysledna(2,:);
dFzvysledna=dFzvysledna(1,:)+dF2zvysledna(2,:);
```

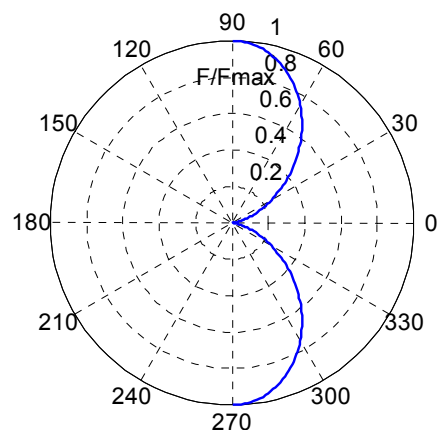
Vykreslení směrových charakteristik pak získáme jako

```
figure;
dFxvysledna=dFxvysledna/max(dFxvysledna);
polar(THETAR, dFxvysledna, 'b');
text(-0.2, 0.8, 'F/Fmax')
title('Vysledna funkce zareni, slozka x');
```

složka y výsledné funkce záření

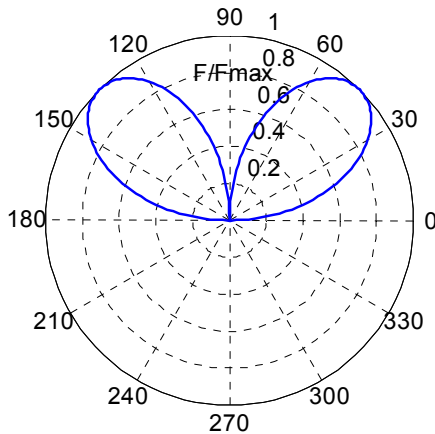


složka x výsledné funkce záření

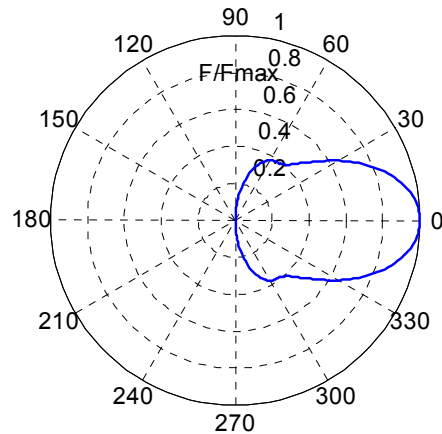


Obr. 10. Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích v ose x při $\phi = 90^\circ$ (MATLAB).

složka z výsledné funkce záření



velikost výsledné funkce záření

**Obr. 11.** Směrové charakteristiky v polárních souřadnicích v ose x při $\varphi=90^\circ$ (MATLAB).

Směrové charakteristiky pro anténní soustavu při umístění antén do osy x , jež mají orientaci vektoru ve směru y ($\mathbf{dL} = [0, 1, 0]$, $\mathbf{R} = [\pm\lambda/4, 0, 0]$). Čtveřice charakteristik odpovídá (obr. 10, 11) složkám x, y, z výsledné funkce záření a její výsledné velikosti.

Dalšími příklady výpočtu jsou směrové charakteristiky anténní řady, jejíž prvky jsou umístěny do osy y a orientovány jsou ve směru y ($\mathbf{dL} = [0, 1, 0]$, $\mathbf{R} = [0, \pm\lambda/4, 0]$), a dále směrové charakteristiky anténní řady, jejíž prvky jsou umístěny do osy z a orientovány jsou ve směru y ($\mathbf{dL} = [0, 1, 0]$, $\mathbf{R} = [0, 0, \pm\lambda/4]$). Tyto směrové charakteristiky se o moc neliší od směrových charakteristik popsanych výše (mají jen o trochu užší hlavní lalok), proto zde nebudou uváděny.

Z těchto charakteristik, sestávajících z jednotlivých složek funkce záření F_x, F_y, F_z , je vidět, že všechny složky jsou nenulové. Nicméně složka z by pro uvedený případ měla být nulová. Při bližším prozkoumání vztahu (4) a především vektorového součinu $(\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0$ lze zjistit, že pro různé hodnoty úhlů dostáváme různé výsledky. Např. anténa umístěná v ose y by měla mít nenulovou pouze složku y . Směrová charakteristika pak závisí jen na úhlu ϑ . Aby toto tvrzení dostalo své opodstatnění, bude zde uveden krátký příklad.

Mějme anténu umístěnou do osy y , tj. $\mathbf{dL} = [0, 1, 0]$ a $\mathbf{r}_0 = [\sin(\nu)\cos(\varphi), \sin(\nu)\sin(\varphi), \cos(\nu)]$. Pro $\varphi = 90^\circ$ je vektor $\mathbf{r}_0 = [0, \sin(\nu), \cos(\nu)]$ a vektorový součin $(\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0$ vypadá takto:

$$\begin{aligned} \text{1. krok: } \nu = -90^\circ, \quad \mathbf{dL} &= [0, 1, 0] & \mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0 &= [0, 0, 0], \\ & \mathbf{r}_0 = [0, -1, 0], & & \\ & \text{součin } (\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0 &= [0, 0, 0] \\ \text{2. krok: } \nu = -89^\circ, \quad \mathbf{dL} &= [0, 1, 0] & \mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0 &= [0.0175, 0, 0] \\ & \mathbf{r}_0 = [0, -1, -0.0175], & & \\ & \text{součin } (\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0 &= [0, -0.0175^2, -0.0175] \end{aligned}$$

Zde už jsou ve druhém kroku nenulové dvě složky y a z , přičemž z by měla být nulová. Pro $\varphi = 0^\circ$ je vektor $\mathbf{r}_0 = [\sin(\nu), 0, \cos(\nu)]$ a vektorový součin $(\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0$ vypadá takto:

$$\begin{aligned} \text{1. krok: } \nu = -90^\circ, \quad \mathbf{dL} &= [0, 1, 0] & \mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0 &= [0, 0, 1], \\ & \mathbf{r}_0 = [-1, 0, 0], & & \\ & \text{součin } (\mathbf{dL} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0 &= [0, -1, 0] \end{aligned}$$

2. krok: $\nu = -89^\circ$, $\mathbf{dl} = [0, 1, 0]$, $\mathbf{r}_0 = [-1, 0, 0.0175]$, $\mathbf{dl} \times \mathbf{r}_0 = [0.0175, 0, 1]$

$$\text{součin}(\mathbf{dl} \times \mathbf{r}_0) \times \mathbf{r}_0 = [0, -1 - 0.0175^2, 0]$$

V tomto případě je pro $\varphi = 0^\circ$ nenulová pouze složka y . Rozdíl je tedy zřejmý. Proto byl pro výpočet funkce záření anténní soustavy zvolen výpočet pomocí vztahu skalárního.

3.2 Výpočet funkce záření pomocí skalárního vztahu

Výpočet funkce záření pomocí skalárního vztahu ukážeme příkladem popisu kódu v programu Matlab. Nejdříve však uveďme teoretický rozbor řešení. Vycházíme ze známého vztahu pro výpočet funkce záření antény. Obecný vztah pro funkci záření je dán vztahem [2]

$$F(\psi) = \frac{\cos[k.l.\cos(\psi)] - \cos(k.l.)}{\sin(\psi)}, \quad (5)$$

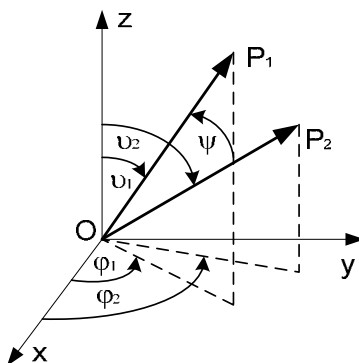
kde $k = 2\pi / \lambda$ a značí vlnové číslo, l je délka dipólu a úhel ψ svírá průvodič k bodu pozorování s osou dipólu. Za $\cos(\psi)$ se obvykle dosazují hodnoty [9]:

$$\cos(\psi_x) = \sin(\nu) \cdot \cos(\varphi),$$

$$\cos(\psi_y) = \sin(\nu) \cdot \sin(\varphi),$$

$$\cos(\psi_z) = \cos(\nu),$$

kde $\cos(\psi_x)$ je úhel pro orientaci antény v ose x atp. Pomocí těchto vztahů umožňujeme transformaci z kartézské souřadné soustavy do sférické a naopak. Konkrétním nastavením hodnot úhlů φ a ν dostaneme funkci záření v požadované rovině (xy , yz , xz) a zároveň lze zvolit vhodným dosazením za $\cos(\psi)$ výpočet funkce záření pro anténu s určitou orientací (rovnoběžnou s osou x, y, z).



Obr. 12. Úhel dvou radiusvektorů OP_1 a OP_2

Abychom mohli vypočítat funkci záření antény orientovanou libovolně v prostoru, ne pouze s orientací rovnoběžnou s osami x, y, z , což je v našem případě vyžadováno, výše uvedené vztahy nejsou plně vyhovující. Musíme tedy za $\cos(\psi)$ dosadit vztah pro výpočet úhlu dvou radiusvektorů OP_1 a OP_2 , který toto umožňuje (obr.12). Obecný vztah pro $\cos(\psi)$ je následující [9]:

$$\cos(\psi) = \cos(\alpha_1) \cdot \cos(\alpha_2) + \cos(\beta_1) \cdot \cos(\beta_2) + \cos(\gamma_1) \cdot \cos(\gamma_2), \quad (6)$$

kde úhly $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$ resp. $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$ jsou velikosti směrových úhlů radiusvektorů OP_1 resp. OP_2 . Další definice říká, že OP_1 a OP_2 jsou \perp právě tehdy, když platí: $\cos(\psi)=0$.

Úhly $\alpha_1, \beta_1, \gamma_1$, vyjádříme bod pozorování a stejným způsobem vyjádříme natočení antény v prostoru úhly $\alpha_2, \beta_2, \gamma_2$. Tedy $\cos(\alpha_1)=\sin(v_1).\cos(\varphi_1)$, $\cos(\alpha_2)=\sin(v_2).\cos(\varphi_2)$ atd.

Úhly v_1 a φ_1 určíme bod pozorování, tedy zvolíme si požadovanou rovinu pro výpočet směrové charakteristiky, např. pro horizontální rovinu(xy) nastavíme úhel v_1 na hodnotu 90° a úhel φ_1 necháme měnit v rozmezí hodnot úhlů (0 až 360°). Stejným způsobem natočíme anténu do požadovaného směru velikostí úhlů v_2 a φ_2 a to stanovením pevné hodnoty těchto úhlů. Např. při odklonu antény od vertikální osy z o 15° do směru y budou velikosti úhlů $v_2=15^\circ$ a $\varphi_2=90^\circ$.

Tímto je jeden úhel ψ , který je svírá mezi radiusvektory OP_1 a OP_2 , určen nebo bychom mohli říci, že je také funkcí čtyř úhlů $v_1, \varphi_1, v_2, \varphi_2$, tedy $\psi=f(v_1, \varphi_1, v_2, \varphi_2)$ (obr. 12).

Jmenovatel zlomku $\sin(\psi)$ lze přepsat na tvar $\sin(\psi)=(1-\cos(\psi).\cos(\psi))^{1/2}$, do kterého následně dosazujeme výše uvedené hodnoty úhlů.

Takto bychom vypočítali funkci záření jedné jediné antény. Hodilo by se tedy vhodněji označit funkci záření $F(\psi)$ jako $F(\psi_1)$. V našem případě, kdy budeme počítat celkovou funkci záření soustavy 12 antén budou pro různě natočené a s různou délkou ramen antén rozdílné funkce záření, $F(\psi_1)$ až $F(\psi_{12})$.

Aby bylo možné realizovat výpočet funkce záření soustavy antén, musí být vztah (5) ještě doplněn o skupinovou funkci záření F_{sk} , která vyjadřuje vliv rozmístění anténních prvků v prostoru a jejich buzení na směrovou charakteristiku anténní řady. Skupinová funkce záření je dána vztahem [1]

$$F_{sk}(\varphi, \vartheta) = \sum_{i=1}^N \frac{I_i}{I_0} \cdot \exp(j.k.\Delta r_i), \quad (7)$$

kde I_0 je zvolený vztažný proud, $I_i = I_0 \cdot \exp(j.k.\Phi)$ jsou proudy v ostatních prvcích s fázovým rozdílem Φ . Dráhový rozdíl Δr_i se obecně vypočítá podle [1]

$$\Delta r_i = x_i \cdot \sin(v) \cdot \cos(\varphi) + y_i \cdot \sin(v) \cdot \sin(\varphi) + z_i \cdot \cos(v), \quad (8)$$

kde x_i, y_i, z_i jsou souřadnice(poloha) i -té antény a úhly v, φ mají v našem případě stejnou velikost jako v_1, φ_1 . Jedním úhlem vybereme rovinu a druhý měníme v rozmezí (0 až 360°).

Tento vztah pro dráhový rozdíl Δr_i lze také přepsat na tvar $\Delta r_{ix} = x_i \cdot \sin(v_i) \cdot \cos(\varphi_i)$, $\Delta r_{iy} = y_i \cdot \sin(v_i) \cdot \sin(\varphi_i)$, $\Delta r_{iz} = z_i \cdot \cos(v_i)$ čímž dostaneme tři složky dráhového posuvu x, y, z . Dosazením do vztahu (7) získáme opět tři složky $F_{xisk}, F_{yisk}, F_{zisk}$ a jejich vynásobením dostaneme požadovanou skupinovou funkci záření F_{isk} . Toho jsme s výhodou využili v našem případě.

Výsledná funkce záření soustavy antén je dána součtem součinů funkcí záření anténních prvků F_i a skupinové funkce záření F_{isk} , tedy $E = \sum_{i=1}^N F_i \cdot F_{isk}$, kde index N značí počet antén.

Pro postup výpočtu funkce záření anténní soustavy je zde vypsána podstatná část komentovaného zdrojového kódu. Budou uvedeny výsledky výpočtů, zobrazeny směrové charakteristiky antén a bude uvedeno jejich porovnání s výpočty v komerčních programech SuperNec a 4nec2.

Níže uvedený zdrojový kód slouží k analýze anténní řady sestávající ze dvou anténních prvků.

Kód programu radiation.m vypadá takto:

```

c=3e8;
f=300e6;
lambda=c/f;
k=2*pi/lambda;

fi=(0:0.1:360)*pi/180;
theta=(90)*pi/180;

fi2=[0,0]*pi/180;
theta2=[0,0]*pi/180;

l=[0.25,0.25];
x=[-2,2];
y=[3,0];
z=[0,0];

for t=1:2
    cospx1(t,:)=sin(theta)*cos(fi);
    cospy1(t,:)=sin(theta)*sin(fi);
    cospz1(t,:)=cos(theta);
    cospx2(t)=sin(theta2(t))*cos(fi2(t));
    cospy2(t)=sin(theta2(t))*sin(fi2(t));
    cospz2(t)=cos(theta2(t));

    cospsi(t,:)=(cospx1(t,:)*cospx2(t))+(cospy1(t,:)*cospy2(t))+(cospz1(t,:)*cospz2(t));

    dn=sqrt(1-cospsi.*cospsi);
    [a,b]=min(abs(dn));
    in=0;
    while a==0
        in=in+1;
        m(in)=b;
        dn(b)=1;
        [a,b]=min(abs(dn));
    end

    Fd(t,:)=(cos(k*l(t)*cospsi(t,:))-cos(k*l(t)))./dn(t,:);

    Fxskup(t,:)=exp(j*k*x(t)*sin(theta)*cos(fi));
    Fyskup(t,:)=exp(j*k*y(t)*sin(theta)*sin(fi));
    Fzskup(t,:)=exp(j*k*z(t)*cos(theta));
    F_skup(t,:)=Fxskup(t,:).*Fyskup(t,:).*Fzskup(t,:);

    Evysl(t,:)=Fd(t,:).*F_skup(t,:);
    Evysl(3,:)=Evysl(3,:)+Evysl(t,:);

    figure;
    polar(fi,abs(Evysl(3,:))/max(abs(Evysl(3,:))), 'b');
    text(-0.2, 0.8, 'F/Fmax');
end

```

Celková skupinová funkce záření je počítána jako součin dílčích (pro každou anténu zvlášť) skupinových funkcí záření součinu složek F_x , F_y , F_z , které jsou počítány následovně:

%výsledná funkce záření

4 Optimalizace

Optimalizaci využíváme ke zlepšení požadovaných parametrů antény. Mohou to být např. impedanční parametry, výkonové přizpůsobení nebo např. směrová charakteristika. Podle počtu optimalizovaných parametrů lze při změně jednoho parametru mluvit o optimalizaci jedno-kriteriální, v případě potřeby zlepšit dva a více parametrů současně mluvíme o optimalizaci multi-kriteriální.

Optimalizační metody lze dále rozdělit na lokální a globální. Zatímco lokální metody jsou značně závislé na počátečních podmínkách (výchozí stav) a jsou schopny nalézt pouze lokální minimum (maximum) v blízkém okolí výchozího bodu, globální metody jsou schopné najít globální minimum (maximum) v celém řešeném prostoru (*solution space*) a na počátečních podmínkách nejsou tolik závislé.

Hledání nejlepšího řešení dané úlohy je vždy kompromisem. Globální metody jsou přesnější, pomaleji však konvergují oproti metodám lokálním. Je tedy důležité zvolit vhodnou optimalizační metodu pro konkrétní řešení. Pro náš případ hledání optima v neznámém prostoru použijeme metod globálních.

Nejznámějšími globálními optimalizačními metodami jsou metoda roje částic (PSO, *Particle Swarm Optimization*, 1995), genetické algoritmy (GA, *Genetic Algorithms*, od poloviny 20. století), metoda společenství mravenců (ACO, *Ant-Colony Optimization*, 2004), samo-organizující se migrační algoritmus (SOMA, *Self-Organizing Migrating Algorithm*, 1999) a diferenciální evoluce (DE, *Differential Evolution*, 1995). V našem případě k optimalizaci směrové charakteristiky (funkce záření) soustavy antén použijeme metodu roje částic a genetické algoritmy. Ty mezi sebou následně porovnáme.

4.1. Metoda roje částic

Metoda roje částic (PSO) je algoritmus vyvinutý v roce 1995 Dr. J. Kennedym a Dr. R. C. Eberhartem. Optimalizace vychází z inteligence roje pozorované u hejn včel, ryb nebo ptáků. Na počátku je roj (včel) rozmístěn libovolně v řešeném prostoru (*solution space*), který se snaží prohledat a najít místo s největším výskytem rozkvetlých květín. Všechny včely (agenti) poletují krajinou různou rychlostí a pamatují si svoje dosavadní nejlepší místo, tzv. p_{best} , tedy místo s největší hustotou rozkvetlých květín. Zároveň vědí o nejlepším objevu (místě), tzv. g_{best} celého hejna, což je tím nejlepším místem ze všech osobních objevů. Následně poletují řešeným prostorem mezi svým nejlepším místem a globálním místem, o kterém se dozvěděly od ostatních včel. Pokud při přelétávání z místa na místo narazí včely na lepší místo, tedy místo s více rozkvetlými květinami, zapamatuje si ho jako svoje nejlepší místo a navíc řekne o tomto objevu ostatním včelám, aby i ony mohly letět k danému místu a třeba narazit na ještě lepší plochu rozkvetlých květín, s kterou by se mohly pochlubit. Tímto způsobem je prohledáváno pole postupně, až se skončí v místě s největším počtem rozkvetlých květín.

Zůstaňme u idey metody roje částic, ovšem přejdeme od včel poletujících po louce hledajíc co možná nejvíce rozkvetlých květín k matematické formulaci použitelné pro optimalizační proces.

Nejdříve však ještě uvedme některé používané výrazy.

- Agentem rozumějme včeličku zvanou jedinec nebo částečka, poletující řešeným prostorem mezi osobním extrémem a místem extrému, určeným celým rojem (globálním extrémem).
- Globálním extrémem funkce $f(x)$ rozumíme takový bod, kde je funkční hodnota v tomto bodě menší nebo rovna funkční hodnotě v libovolném jiném bodě v celém definičním oboru D_f (oboru hodnot). Takový bod je pak globálním minimem. Pro globální minimum můžeme psát: $\min f(x), x \in D_f$.
- Tyto body se nachází na určité pozici. Pozicí rozumíme souřadnice částečky v řešeném prostoru, který je obecně N -rozměrný a ve kterém řešíme optimalizační problém. Soubor těchto souřadnic následně reprezentuje řešení tohoto problému v daném prostoru.
- Fitness funkce, kritériální funkce, účelová funkce, hodnotová funkce nebo někdy také nazývaná funkce míry úspěšnosti, jakosti, slouží k ohodnocení kvality nalezeného řešení na dané pozici a lze ji označit písmenem Q . Přepočítává se pro každého jedince zvlášť a záleží na vzdálenosti od extrému. Typ *fitness* funkce závisí na konkrétním případě, respektující určitým způsobem naše požadavky. Výstupem každé *fitness* funkce je vždy číslo, které porovnáváme s ostatními. Optimu odpovídá minimální hodnota Q , v ideálním případě nula. Matematickým výpočtem dostaneme: $Q_i = (p_i - s_i)^2$, kde p_i je požadovaná hodnota i -té veličiny (vlastnosti) systému a s_i je hodnota této veličiny získaná optimalizačním krokem. Blíže je tato problematika popsána v [8].
- p_{best} : je hodnota udávající pozici agenta, ve které dosáhl nejlepší *fitness* funkce. V každém bodě iterace, svojí trajektorie, se hodnota přepočítává a porovnává se svojí nejlepší, doposud nalezenou hodnotou. Pokud je právě vypočítaná hodnota lepší než doposud nejlepší hodnota *fitness*, nahradí se nejlepší hodnota právě vypočítanou a ta nese název p_{best} (*personal best*).
- g_{best} : je hodnota udávající pozici, která je nejlepším p_{best} z celkového počtu agentů. V každém kroku iterace se vezme hodnota p_{best} od všech zúčastněných agentů a nejlepší p_{best} se uloží do g_{best} (*global best*). Protože roj (všichni agenti) se pohybují směrem od svého osobního p_{best} k g_{best} , po určitém počtu iterací skončí v jednom místě, což je ono optimalizované řešení.
- Rychlost v_i je rychlost změny výstupních parametrů v i -tém kroku oproti $i-1$ kroku.

Na tomto místě bych přiblížil jednotlivé kroky běhu programu. Nejdříve je za potřeby stanovit řešený prostor. Jde tedy o výběr fyzických parametrů (např. délka, tloušťka, permitivita, souřadnice), které potřebujeme optimalizovat. Je ovšem nutné omezit je v určitém rozsahu hodnot, pro které má úloha fyzické řešení.

V dalším kroku definujeme *fitness* funkci.

Tyto dva body programu jsou klíčové a jsou specificky určeny pro každou optimalizaci. Zbytek běhu programu není závislý na optimalizovaném programu, je takřka rutinní a lze ho použít pro spoustu jiných aplikací.

V dalším jsou agenti umístěny téměř náhodně do počátečních souřadnic, a zároveň se nastaví náhodně jejich rychlost v_i např. v rozsahu hodnot $(0,1)$. Každý agent se pohybuje v prvním kroku touto rychlostí po zkoumaném prostoru, počítá se jeho *fitness* funkce a určí se hodnota p_{best} . Ta se porovná mezi všemi agenty a nejlepší p_{best} ze všech agentů je g_{best} . Tento postup se opakuje v dalších krocích programu, vypočítají se nové hodnoty p_{best} a pokud je nějaká z těchto hodnot lepší než g_{best} , stane se ona tou nejlepší pozicí g_{best} .

Nyní uveďme výpočetní vztahy pro výše uvedený princip metody PSO. Rychlost agenta je stanovena v každém kroku iterace zvlášť pro každého agenta a ovlivňuje směr, jímž se pohybuje. Je dána vztahem [11]

$$v_{n+1} = w \cdot v_n + c_1 \cdot r_1 \cdot [p_{best} - x_n] + c_2 \cdot r_2 \cdot [g_{best} - x_n], \quad (9)$$

kde v_n je původní rychlost agenta v n -tém iteračním kroku a x_n je souřadnice agenta v prostoru v n -tém iteračním kroku. Koeficient w se nazývá váhovací faktor (*weighted factor*) a udává, jakou měrou je agent držen ve svém původním směru. Tento faktor může být po celou dobu optimalizace konstantní nebo se může měnit v určitých mezích w_{max} a w_{min} . Klesajícím faktorem zabráňujeme nepříjemným oscilacím a tím stimulujeme hejno ke konvergenci nad určitým nalezeným globálním minimem hejna g_{best} . Koeficienty c_1 a c_2 určují, jakou měrou bude výsledná rychlost odvozena od minima daného agenta a nakolik od globálního minima. Koeficient c_1 určuje, jakou měrou je jeho pohyb ovlivněn vzpomínkou na p_{best} , c_2 pak udává míru tahu ke g_{best} . S rostoucími koeficienty roste zájem o prozkoumání okolí (směr p_{best} , g_{best}) daného koeficientu. Koeficienty r_1 a r_2 jsou náhodně generovaná čísla v mezích (0,1), k čemuž využijeme v prostředí Matlab funkce *rand()*. Slouží to k simulaci nepředvídatelného pohybu částic v roji.

Nyní již víme směr pohybu a rychlost agentů a lze tedy vypočítat nové souřadnice (pozice) agentů jako [11]:

$$x_{n+1} = x_n + \Delta t \cdot v_{n+1}, \quad (10)$$

kde Δt je časový krok (obecně může nabývat libovolných hodnot), za který se změní pozice agenta. Nové souřadnice agenta tedy získáme jako součet původní pozice x_n a přírůstkem pohybu(dráhy) daným rychlostí agenta v_{n+1} s časovým krokem Δt .

Celý proces se opakuje, dokud není nalezeno správné řešení nebo není dosaženo zadaného počtu iterací.

Výše uvedené vztahy však nijak neomezují pohyb agentů a mohou tedy opustit řešený prostor. Proto bylo navrženo několik technik, které se tomuto snaží zabránit. Mezi nejpoužívanější metody patří [11]:

- Omezení maximální rychlosti agentů v_{max}
- Ohraničující zdi:
 1. Absorpční zeď. Pokud narazí částice na rozhraní řešeného prostoru, její rychlost je vynulována a částice je tažena zpět do řešeného prostoru.
 2. Odrazná zeď. Pokud narazí částice na rozhraní řešeného prostoru, znaménko rychlosti je invertováno a částice je odražena zpět do řešeného prostoru
 3. Neviditelná zeď. Částici je dovoleno letět mimo prostor, ovšem přestane se jí počítat hodnota fitness funkce; částice je tak automaticky tažena zpět do řešeného prostoru.

4.2. Genetické algoritmy

První výzkumy a pokusy modelování evoluce byly prováděny již v padesátých letech 20. století. Za objevitele je považován prof. John Henry Holland, který položil základy GA v letech sedmdesátých. Od té doby se začaly genetické algoritmy velmi rozvíjet a v oblasti elektromagnetismu se začaly využívat koncem let osmdesátých. Ukázaly se být velmi výhodnými především v optimalizačních úlohách a zapsaly se díky svým vlastnostem do třídy globálních optimalizačních metod.

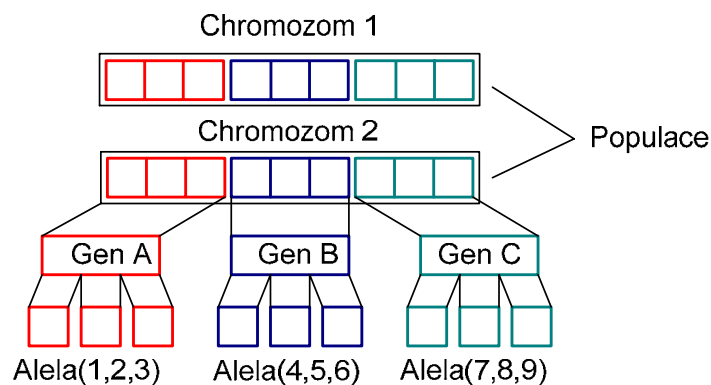
Protože parametrický prostor je typicky příliš velký pro dokonalé prozkoumání, používají se různé stochastické metody pro přibližné řešení. Gradientní metody např. reprezentují hledání lokálního extrému pomocí jednoho zpřesňujícího se řešení. Metoda genetických algoritmů, jež je inspirována genetickými principy evoluce, jako je přirozený výběr, křížení mutace, využívá jiný přístup. Uvažuje celou populaci prozatímních řešení, jež paralelně procházejí parametrický prostor, vzájemně se ovlivňují a modifikují pomocí genetických operátorů. Takovýmto prohledáváním parametrického prostoru se dosáhne efektivnějšího prohledávání, čímž se najde správné řešení rychleji, než kdybychom prohledávali prostor izolovaně. Udává se, že populace o n jedincích pracuje přibližně stejně tak rychle jako n^3 izolovaných „hledáčů“ [10].

Genetické algoritmy mají tedy oproti klasickým optimalizacím určité specifické vlastnosti: pracují s řetězcem zakódovaných hodnot parametrů (tzv. *chromozom*), neoptimalizují najednou jediné řešení úlohy, ale pracují současně s celou skupinou (*populací*) různých řešení [8].

V porovnání s PSO jsou zde agenti reprezentováni chromozomy, které nesou informaci o agentu (jedinci). Hodnoty parametrů jsou v nich zakódovány binárně. Cílem genetického algoritmu je vytvoření kvalitnějších jedinců než byli v generaci původní, což opět ohodnotíme pomocí *fitness funkce* Q . Každý jedinec s konkrétní fitness funkcí odpovídá konkrétnímu řešení. O skupině řešení (chromozomu) mluvíme o tzv. populaci. Optimalizační proces začíná výchozí populací o několika desítkách jedinců. V průběhu se jedinci zkvalitňují křížením, mutací nebo selekcí, počet jedinců však zůstává stejný. Nová obměna populace vytváří novou generaci.

Nyní vysvětleme užívané pojmy, operace a kroky programu.

- **Chromozom, gen, alela.** Abychom mohli vyjádřit parametry *chromozomu* v binární soustavě, musíme dekadické hodnoty parametrů převést do binární podoby. Sled jedniček a nul jednoho parametru pak tvoří jeden *gen*, a každý jeho prvek je jedna *alela*. Seřazením genů příslušných parametrů vedle sebe získáme chromozom. Skupina několika chromozomů pak tvoří populaci, jak ukazuje obr. 13.



Obr. 13. Vytvoření genu, chromozomu a populace

Při spuštění programu je chromozom zastupující hodnoty parametrů, popisující vlastnosti optimalizovaného systému, náhodně vygenerován počítačem. Tím dostaneme náhodnou sekvenci jedniček a nul, první generaci na zadaném definičním oboru. Po vytvoření této generace vypočítáme fitness funkci všech jedinců. K tomu je potřeba nejdříve rozdělit chromozomy na geny a převést zpět na dekadickou formu, abychom je mohli dosadit do vztahu pro výpočet fitness funkce. Na jejím základě se poté snažíme vytvořit novou, lepší generaci směřující k optimu definovaném fitness funkcí Q . Tu můžeme vytvořit následovně:

- První možností je **výběr (selekce)** jedinců. Výběr do značné míry rozhoduje o **rychlosti konvergence**. Možností výběru je hned několik. Na začátek uveďme nepříliš vhodnou metodu a to *decimaci populace*. Tato metoda je založená na seřazení jedinců podle velikosti fitness funkce Q a zrušení horší poloviny. Nevýhodou je, že s vyloučenými jedinci můžeme ztratit i nějakou výhodnou sekvenci bitů v tomto jedinci, přestože má nízkou hodnotu funkce kvality. Tato sekvence se následně nesnadno hledá a k jejímu znovu-vzniknutí dojde až náhodnou mutací nebo křížením (vysvětleno níže). Proces optimalizace a tudíž konvergence se tak zpomalí. Proto se v praktických aplikacích genetických algoritmů snažíme vyhnout bezmyšlenkovité likvidaci poloviny populace a aplikujeme selekci jedinců náhodně.
- Další možností výběru je tzv. **proporcionální výběr**, ruletová selekce nebo také princip vážené rulety. Tato metoda selekce modeluje Darwinistický přirozený výběr tak, že vybírá jednotlivce náhodně, ovšem s pravděpodobností úměrnou funkci kvality Q . Pravděpodobnost výběru i -tého jedince je pak např. dáno vztahem [8]

$$p_i = \frac{Q_i}{\sum_i Q_i}, \quad (11)$$

kde Q_i je hodnota funkce kvality i -tého jedince. Princip vážené rulety se této metodě říká také proto, že si výběr můžeme představit jako ruletové kolo, které rozdělíme na jinak velké výseče a velikost těchto výsečí je úměrná hodnotě funkce kvality příslušného jedince. Náhodný výběr jedinců (otočení rulety) se opakuje tolikrát, až získáme dostatečný počet pro další generaci.

Výhodou této metody oproti metodě výběru decimace populace je určitá šance slabšího jedince dostat se do další generace i s nízkou hodnotou funkce kvality. Musíme mít ale na paměti, že tento postup platí, pokud optimalizujeme na maximum funkce Q . V opačném případě hledání minima musíme upravit fitness funkci tak, aby minimu hledané veličiny odpovídalo maximum hodnotové funkce Q .

- Často používanou metodou výběru je tzv. **výběr soutěží** (turnajový výběr). Metoda je založena na náhodném výběru skupinky jedinců z níž do další generace postupuje jedinec s největší hodnotou hodnotové funkce Q . Následně se všichni vracejí zpět do generace původní a děj se opakuje, až je dostatečný počet jedinců v nové generaci. Je zřejmé, že díky náhodnosti výběru se může stát, že v nové generaci je nejsilnější jedinec zastoupen buď vícekrát nebo teoreticky ani jednou. To by neznamenal neúspěch optimalizace, ale může to v případě žádného zastoupení způsobit zpomalení konvergence. Tomuto se předchází tzv. elitářským mechanismem, kdy je nejsilnější jedinec jednoduše přidán do nové generace místo někoho jiného.
- Další z metod vytvoření nových jedinců v populaci je proces **křížení**. Noví jedinci pro příští generaci vznikají křížením dvou jedinců stávající generace. Nejčastějším typem křížení je křížení jednobodové, kdy se zvolí pozice, na které se jedinci (chromozomy)

rozdělí na části a ty se pak vzájemně prohodí. Ze dvou jedinců tak vzniknou dva noví jedinci, kteří převezmou část genetické informace od „otce“ a „matky“. Někdy se používá i křížení vícebodové, kde limitním případem je tzv. uniformní křížení. U něho se pro každou *alelu* náhodně určí, do kterého z nových jedinců se konkrétní alela zařadí. Výhodou tohoto křížení je, že nezáleží na pořadí, v kterém je informace v chromozomu zakódována.

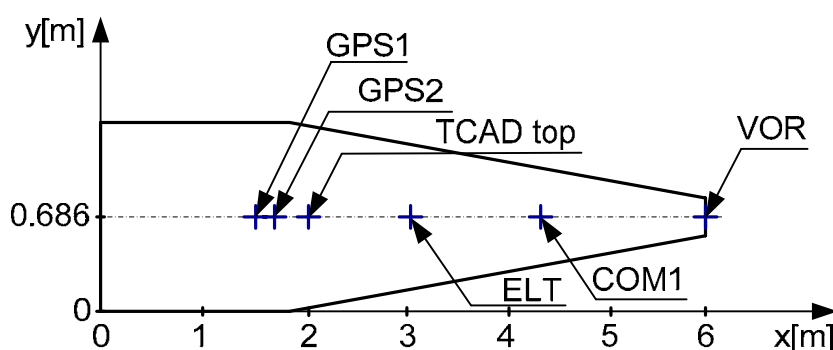
- Při optimalizačním procesu s časem, nebo s přibývajícím počtem iterací roste kvalita jedinců, až jsou v pozdější generaci všichni jedinci stejní. Tím se vývoj zastaví. Aby se tomuto do určité míry předešlo, jsou nutné **mutace** těchto jedinců. Postup je jednoduchý. Na náhodně zvolených alelách se invertuje bit. Tím dostaneme nového „zmutovaného“ jedince a zabráníme tak uvíznutí celého procesu v lokálním minimu optimalizované funkce. Míra procesu mutace je mnohem menší než proces křížení a záleží v jaké fázi optimalizace se právě nacházíme. Ze začátku generace nových jedinců nebude mutace tak razantní, abychom neztratili nějakou důležitou informaci (sekvenci bitů-alel), ale později může být mutace razantnější. Výhodné proto může být měnit procento mutovaných bitů podle průběhu optimalizace od malých hodnot k větším.

4.3. Podmínky optimalizace

Úkolem optimalizace antén letounu VUT 100 bylo rozmístit 13 antén radionavigačních systémů tak, aby se co možná nejméně ovlivňovaly z hlediska směrových charakteristik. V našem případě se budeme snažit o všesměrovější horizontální směrovou charakteristiku s přihlédnutím k požadavkům na umístění jednotlivých antén na trup letounu příslušnými výrobci.

Letadlo využívá tedy 13 antén pro různý typ činnosti, z toho šest jich je umístěno na horní části a sedm na spodní části trupu letounu. Při optimalizaci budeme měnit pouze x-ové a y-ové souřadnice antén. Souřadnice z-ové jsou pevně stanovené, protože nelze „přehazovat“ antény ze spodku letounu na vršek a naopak.

Na obr.14 je zobrazeno rozmístění vrchní části trupu letounu s vyznačením polohy šesti antén.



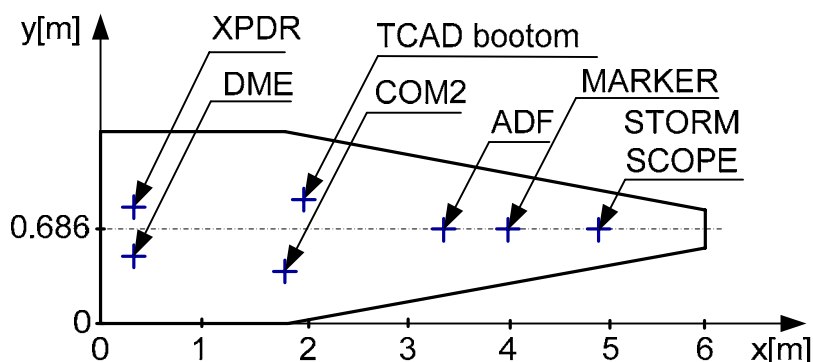
Obr. 14. Rozvržení vršku letadla s vyznačením polohy antén

- **GPS:** slouží pro příjem signálu při určování polohy letounu a mají být umístěny na horní straně trupu letounu s ničím nerušeným výhledem na oblohu. Kolem každé antény má být mj. navíc 30 cm souvislé zemnicí plochy. V současném umístění (poloze) splňují antény těsně tyto požadavky, a proto s nimi nebude při optimalizaci hýbáno. Do optimalizace jako takové však zahrnuty být musí, protože posuzujeme celkovou (společnou) funkci záření soustavy antén.

- **ELT:** je anténou nouzového radiomajáku a používá se čtvrt vlnný monopol obsahující spirálové vinutí. Anténa by měla být umístěna nejlépe na horní části zádě trupu letounu. Upevněna by měla být na primárních letadlových strukturách jako např. nosníky, trámy, vzpěry. Neměla by být umístěna na plášti a poblíž silných zdrojů elektromagnetického záření. Při optimalizaci musíme brát v úvahu tyto požadavky, a proto bude anténou hýbáno pouze o malé hodnoty souřadnic x, y .
- **TCAD_{top}:** je anténou aktivního dotazovacího palubního systému používaný k identifikaci kolize. Umístěna by měla být co možná nejvýše a nejvíce vpředu, zpravidla přímo nad kokpitem. Musí však být dodržen požadavek 30cm souvislé zemní plochy kolem antény. Souřadnice antény nebudou stejné jako u antén GPS během optimalizace měněny.
- **COM1:** je spolu s GPS anténou komunikační radiostanice s přijímačem GPS. Měla by být umístěna nejdále od ELT antén, min 183cm od DME a ostatních COM antén a 122 cm od ADF antén.
- **VOR:** je anténou integrované radiostanice s navigačním přijímačem. Měla by být dostatečně vzdálená od všech projekcí (vodorovné/svislé ocasní plochy, křídlo) vrtulí, motorů. Instalace antény by měla zabezpečovat přímý výhled [3].

Na vršku letounu tak budou měněny souřadnice pouze antén ELT a COM1 a to v malém rozmezí hodnot. Zde jsou vidět omezené možnosti optimalizace. Na tak malém letounu vyvstávají problémy s umístěním a z velké části je optimalizované řešení umístění antén kompromisem.

Na obr.15 je zobrazeno rozmístění spodní části trupu letounu s vyznačením polohy sedmi antén.



Obr. 15. Rozvržení spodku letadla s vyznačením polohy antén

- **DME:** anténa slouží pro měření vzdálenosti letadla od majáku. Slouží jako doplněk radionavigace majáky VOR. Má být umístěna na spodní části trupu letounu, ve vertikální poloze vzhledem k letové poloze.
- **XPDR:** anténa transpondéru (přijímač na kmitočtu 1030MHz, vysílač na kmitočtu 1090MHz). Měla by být umístěna nejméně 91,5 cm od ADF antén a COM antén, min 183 cm od DME mimo větších výčnělků a co nejdále od otvorů.
- **TCAD bootom:** minimálně 91,5 od ostatních vysílacích antén v pásmu L.
- **COM2:** na tuto anténu jsou stejné požadavky jako na anténu COM1.
- **ADF:** je anténou radiokompasu. Instalována je na rovině symetrie letounu. Měla být dodržena minimální vzdálenost od antén DME a XPDR ve vzdálenosti 121,9 cm.

- **MARKER:** anténa pro poskytování informace o vzdálenosti letadla od přistávací plochy. Měla by být umístěna na spodní části trupu letounu na rovném povrchu a co nejdále od vysílacích antén.
- **STORM SCOPE:** anténa pasivního detektoru bouřkové činnosti. Měla by být umístěna na místo bez jakýchkoli nadměrných elektrických poruch a vycentrována na ose letadla [3].

Na spodku letounu budeme měnit polohu(souřadnice) všech antén kromě antény STORM SCOPE, která je na zadní části spodku letounu a pro dodržení podmínek optimalizace její souřadnice nelze měnit.

Celkem tedy bude fixně umístěno 5 z celkového počtu 13 antén. Zbývajících osm antén bude měněno v daném rozmezí hodnot, aby byly přibližně splněny podmínky optimalizace. Úplného dodržení podmínek výrobce antén, na rozmístění, na takto malém letounu není možné a je vždy kompromisem.

V další části této práce budou popsány algoritmy optimalizačních metod PSO a GA v programu MATLAB. Protože bude naše optimalizace směřovat k nalezení všesměrovější charakteristiky v horizontální rovině vertikálně polarizovaných antén, zahrneme do optimalizace všechny antény kromě VOR/LOC/GS. Celkem tedy 12. Zbývajících antén budeme považovat za vertikálně orientované monopóly. V praxi je tvoří obvykle prutové nebo tyčové antény. Tato anténa je tvořena jedním ramenem symetrického dipólu umístěno kolmo nad „zemní“ plochou a je buzena nesymetricky vůči této „zemi“. Podle principu zrcadlení nahradíme vliv proudu v „zemi“ zářením zrcadlového obrazu antény, takže skutečná anténa se zrcadlových obrazem tvoří symetrický dipól¹. Tímto jakoby uvažujeme zemní desku každé antény, ovšem ne požadovaných 30cm, ale nekonečně velkou. Do výpočtu tak vnášíme do určitou chybu. Výsledky jsou však přesto poměrně přesné jak je ukázáno dále.

4.4. Algoritmus PSO v programu Matlab

Kód je napsán tak, že bylo postupováno podle předchozích znalostí uvedených v části 4.1. Program pro hledání optimálního umístění antén na trupu letounu vypadá následovně. Nejdříve je nutné zadat vstupní parametry, kterými jsou: počet iterací G , tedy počet kroků, které ujde každá částice během hledání minima kritériální funkce, počet těchto částic(agentů), označme je např. I , velikost těchto kroků dt , ve vztahu (7) jsou pak ještě konstanty c_1 a c_2 a spolu s tímto nadefinujeme také agenty do počátečních souřadnic. Kód programu `main.m` pro tuto část vypadá následovně:

```
I=50; % počet agentu
G=200; % počet iterací
dt = 0.1; % iterační krok
c1 = 1.49; % váha k pbest
c2 = 1.49; % váha k gbest

x = zeros( I, 25); % pozice agentů-vynulování
p = zeros( I, 25); % personal best

% x(1:12)= x souřadnice x
% x(13:24)= y souřadnice y

%nastavení agentů do počátečních
souřadnic

for n=1:I
    x(n,1) = 0.33 +0.5*rand(); p(n,1) = x(n,1);
```

¹ NOVÁČEK, Z., ČERNOHORSKÝ, D. *Antény a šíření radiových vln*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTUM, 2005.

```

x(n,2) = 0.33 +0.5*rand(); p(n,2) = x(n,2);
x(n,3) = 1.846 +0.5*rand(); p(n,3) = x(n,3);
x(n,4) = 1.96 +0.5*rand(); p(n,4) = x(n,4);
x(n,5) = 3.34 +0.5*rand(); p(n,5) = x(n,5);
x(n,6) = 3.97 +0.5*rand(); p(n,6) = x(n,6);
x(n,7) = 4.81 +0.5*rand(); p(n,7) = x(n,7);
.
.
.
x(n,24) = 0.686 +0.22*rand(); p(n,24) = x(n,24);
p(n,25) = 1e+6;
end

```

kde za hodnoty $x(n,1)$ až $x(n,12)$ jsou dosazeny souřadnice x všech dvanácti uvažovaných antén a hodnoty $x(n,13)$ až $x(n,24)$ zastupují souřadnice y všech antén. Tím je vytvořeno 24 rozměrné pole, které je určeno ještě počtem agentů I , zastupující konkrétní řešení (pozice antén), pro které je počítána funkce záření z níž určíme kritériální funkci (*fitness* funkci). Celkově tedy počítáme s maticí o velikosti [počet agentů, počet proměnných]. Dále se pro každého agenta (řešení) vnáší náhodnost daná funkcí `rand()`, která simuluje nepředvídatelný pohyb částic v roji, jiné souřadnice x, y oproti ostatním částicím. Poté je v této části kódu přiřazena aktuální, náhodně vygenerovaná pozice částice, jako její nejlepší *personal best*, p_{best} , to v prvním kroku a v dalších krocích se hodnota p_{best} přepočítává a ukládá na pozici $p(n,25)$.

Následuje hlavní iterační smyčka, v které je počítána hodnota váhovacího faktoru w , je volána funkce `S_radiation` pro výpočet funkce záření, pomocí které získáme hodnoty pro výpočet kritériální funkce, určíme nejlepší pozici ze všech agentů g_{best} , stanovíme rychlost agentů a vypočítáme nové souřadnice částic. Jako poslední definujeme řešený prostor pomocí absorpčních stěn. Kód programu vypadá takto:

```

for m=1:G % hlavní iterační smyčka
    w = 0.5*(G-m)/G + 0.4; % výpočet váhovacího faktoru w
    for n=1:I
        Eout(n,:)=S_radiation(x(n,:));
        x(n, 25) = sum((1 - Eout(n,1:13)).*(1 - Eout(n,1:13)))';
    end % ^ kritériální funkce
    [e(m+1),ind] = min( x( :,25)); % nejmenší odchylka

```

Jak již bylo řečeno výše, klesajícím váhovacím faktorem zabraňujeme nepříjemným oscilacím a tím stimulujeme hejno ke konvergenci nad určitým nalezeným globálním minimem hejna g_{best} . Proto tuto konstantu w měníme v rozsahu hodnot 0,9-0,4. V následující kroku voláme funkci `S_radiation`. Tato funkce vrací 12 hodnot funkce záření v horizontální rovině po 30-ti stupních a uloží je do proměnné E_{out} . Ty jsou poté odečítány od hodnoty 1, což představuje požadovanou hodnotu a tyto rozdíly jsou sečteny, čímž dostaneme číslo udávající kvalitu systému, hodnotu kritériální funkce. Uložena je do proměnné x na pozici 25. V našem případě je požadovanou hodnotou všesměrová charakteristika (funkce záření). Poté je čtena, pro všechny agenty hodnota kritériální funkce, vybrána nejlepší (nejmenší) hodnota a je uložena do proměnné e . Zároveň máme informaci o konkrétním agentu, který této hodnoty dosáhl a to jeho indexem ind , což je n -tý řádek z n agentů.

Abychom porovnali současnou a předchozí hodnotu kritériální funkce, spustíme následující smyčku:

```

if e(m+1)<e(m)
    g = x( ind, 1:24); % global best
end

```

Pokud je tato hodnota lepší než doposud vypočítaná, podíváme se na agenta, který této kritériální funkce dosáhl, uložíme ji jako nejlepší hodnotu g_{best} tedy přepíšeme g_{best} 24-mi souřadnicemi x a y .

Posledním úkolem programu bude procházet celé hejno a hledat p_{best} , budou se počítat nové rychlosti částic a nové souřadnice. Skript vypadá následovně:

```
for n=1:I
    if x(n,25)<p(n,25) % personal best
        p(n,:) = x(n,:);
    end
    v(n,:) = w*v(n,:) + c1*rand()*( p(n,1:24)-x(n,1:24));
    v(n,:) = v(n,:) + c2*rand()*( g(1,1:24)-x(n,1:24));
    x(n,1:24) = x(n,1:24) + dt*v(n,:);
    if x(n,1) > 0.83, x(n,1)=0.83; end % absorpční zed'
    if x(n,2) > 0.83, x(n,2)=0.83; end
    if x(n,3) > 2.346, x(n,3)=2.346; end
    if x(n,4) > 2.46, x(n,4)=2.46; end
    .
    .
    if x(n,24) > 1.426, x(n,24)=1.426; end
end
```

Rychlost $v(n)$ je počítána podle vztahu (7) a souřadnice x,y jsou přepočítávány podle vztahu (8). Částice jsou pak drženy v řešeném prostoru pomocí absorpčních stěn.

Nyní již stačí vzít hodnotu g_{best} tedy 24 optimalizovaných souřadnic x,y a ty dosadit do funkce `radiation`. Tato funkce vrátí 3600 hodnot funkce záření(po desetině stupně) a uloží je do proměnné E_{out2} . Poté můžeme vykreslit optimalizovanou směrovou charakteristiku soustavy.

4.5. Popis GA v programu Matlab

Stejně jako u algoritmu metody PSO vycházející z teoretických poznatků z části 4.1.(PSO), budeme zde podobně vycházet z teoretického rozboru v článku 4.2.popisující metodu genetických algoritmů.

V prvním kroku hlavního programu `main.m` musíme zadat tyto vstupní parametry. Počet jedinců I , kde jeden jedinec tvoří jedno konkrétní řešení v populaci, dále počet generací G , pravděpodobnost křížení p_c a pravděpodobnost mutace p_m . Po zadání těchto parametrů musí být vygenerována první náhodná generace jedinců. Kód programu může vypadat např. takto:

```
I=60; % I = počet jedinců
G=300; % G = počet generací
pc=0.3; % pc = pravděpodobnost křížení
pm=0.01; % pm = pravděpodobnost mutace
gen = round( rand( I, geb-1)); % náhodně vygenerovaná 1.generace
```

definování vstupních parametrů by mělo být zřejmé z popisků. Pomocí příkazu `rand(I, geb-1)` pak generujeme matici náhodných čísel z intervalu hodnot nula až jedna. Tato matice má I řádků, kde každý řádek představuje jednoho jedince, jedno konkrétní řešení, zastupující souřadnice všech antén a $geb-1$ sloupců, kde geb je celkový počet bitů v chromozomu(sekvence bitů-alel popisující vlastnosti jedince-jeho souřadnice) Pro náš případ má jeden řádek(jedinec-chromozom) 24 sloupců, což představuje 12antén(genů) o souřadnicích(alel) x,y každé antény. Celkový počet bitů v chromozomu geb je dán součinem počtu antén a bitů vyjadřující jednotlivé souřadnice($bit=[8 \ 8 \ 8]$).

Příkaz *round* zaokrouhlí matici náhodných čísel z intervalu od nuly do jedničky na hodnoty nula a jedna, čímž dostaneme náhodné souřadnice (alely) antén vyjádřené v binární podobě. Řádky pak tedy tvoří jednotlivé chromozomy.

Dále postupujeme převodem takto vygenerované populace o souřadnicích v binární podobě do dekadické formy, aby bylo možné provést další výpočty jako jsou např. výpočet kritériální funkce, nalezení jedince s nejlepší hodnotou kritériální funkce a vytváření nových jedinců. K tomu využijeme funkce *decode.m*. Příkaz kódu programu vypadá takto:

```
X = decode( I, bit, gen); % převod chromozomu na X, Y
```

kde vstupními parametry jsou počet jedinců v populaci *I*, počet bitů (*bit*) pro vyjádření souřadnic *x,y* a náhodně vygenerovaná generace *gen* o *I* jedinců. Dekódování pak probíhá následovně.

Nejdříve definujeme pozice posledních bitů parametrů v chromozomu. Kód programu pro první čtyři antény vypadá takto:

```
pos(1) = bit(1); %pozice posledních bitů parametrů
for n=2:24 %v chromozomu
    pos(n) = pos(n-1) + bit(n);
end
```

pozici 1(*pos(1)*) je přiřazena hodnota prvního bitu. Druhé pozici je přiřazena hodnota druhého bitu a přičtena hodnota první pozice. Analogicky získáme další pozice. Takto je pro náš případ definováno 24 pozic.

Dekódování *x*-ových souřadnic prvních čtyř antén je následující:

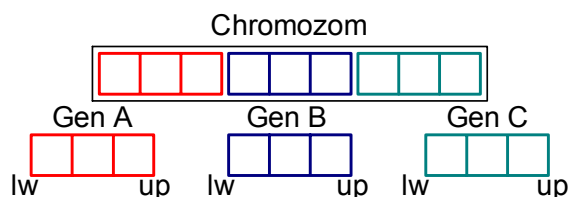
```
X(:, 1) = 0.33 + 0.50 * to_rat( 1, pos(1), 1, gen, bit);
X(:, 2) = 0.33 + 0.50 * to_rat( pos(1)+1, pos(2), 2, gen, bit);
X(:, 3) = 1.846 + 0.50 * to_rat( pos(2)+1, pos(3), 3, gen, bit);
X(:, 4) = 1.96 + 0.50 * to_rat( pos(3)+1, pos(4), 4, gen, bit);
```

kde hodnota 0,33 je původní *x*-ová souřadnice první antény, funkce *to_rat* dekoduje souřadnice z binární do dekadické podoby a je ještě násobena konstantou, zde 0,5, pro udržení souřadnic v daném intervalu. Výsledné souřadnice se ukládají do proměnné *X*. Takto je vypočítáno všech 24 souřadnic, přes všechny jedince. V našem případě výpočtu vyjadřuje prvních 12 hodnot proměnné *X* v každém jedinci *x*-ové souřadnice (*x(:, 1: 12)*) a zbylých 12 hodnot (*x(:, 13: 24)*) vyjadřuje *y*-ové souřadnice všech dvanácti antén.

Funkce *to_rat* dekoduje souřadnice v potřebných intervalech a to následovně:

```
function out = to_rat( lw, up, n, gen, bit);
out = gen(:,lw:up) * pow2( 0:bit(n)-1) ' / pow2( bit(n));
```

kde vstupními parametry jsou *lw* (*LSB*) což představuje začátek genu v chromozomu, v *up* (*MSB*) je hodnota posledního bitu genu v tomto chromozomu (obr. 16), *n* nabývá hodnot 1:24 a ukazuje na pozici v bitu, jehož číslo představuje počet bitů pro vyjádření konkrétní souřadnice *x* nebo *y*. Parametr *gen* představuje matici generace jedinců a má *I* (počet jedinců) řádků a *geb* (celkový počet bitů v chromozomu) sloupců. Posledním parametrem funkce je *bit*, kde jeho hodnoty vyjadřují počet bitů na jeden parametr (souřadnice *x,y*).



Obr. 16. Vytvoření chromozomu třemi geny *A,B,C*

Příkazem `pow2(0:bit(n)-1)` dostaneme hodnoty 2^0 až $2^{(n)}$, které když vydělíme hodnotou $2^{(n)}$ (`pow2(bit(n))`), dostaneme vynásobením příslušných bitů v daném genu hodnotu v rozmezí (0,1) s přesností $1/2^{(n)}$. Převedeme tak parametry chromozomu z binární na dekadickou hodnotu.

Převod chromozomu z binární soustavy do dekadické dostaneme

Třetím významnou částí optimalizace je výpočet kritériální funkce Q . Výpočet provedeme podle známého vztahu $Q_i = (p_i - s_i)^2$, kde p_i je požadovaná hodnota i -té veličiny (vlastnosti) systému a s_i je hodnota této veličiny získaná optimalizačním krokem [8]. Kód programu je takovýto:

```
gen( n, geb) = sum((1 - Eout(n,1:13)).*(1 - Eout(n,1:13)))';
```

kde v proměnné `Eout` je 12 hodnot po 30-ti stupních skupinové funkce záření soustavy antén, které získáme voláním funkce `S_radiation`. Protože se snažíme o všesměrovější charakteristiku v horizontální rovině, odčítáme tyto hodnoty jednotlivě od hodnoty 1, což představuje v normovaném stavu ideální, všesměrový stav (charakteristiku). Umocněním a součtem všech dvanácti hodnot získáme číslo, které je právě naší hledanou kritériální funkcí, kterou se snažíme minimalizovat (v ideálním případě je rovna 0). Hodnota je uložena v matici `gen` pro všechny jedince o n řádcích na `geb` sloupci (posledním v `gen`).

Nyní lze najít jedince s nejmenší „chybou“, odchylkou od požadované hodnoty. Vyhledáním nejmenší hodnoty kritériální funkce přes všechny jedince následně dostaneme souřadnice x, y všech antén, dostaneme tak doposud nejlepší nalezené řešení. Kód programu by měl být zřejmý z popisků příslušných řádků.

```
e(g) = min( gen( :, geb));           % nejmenší hodnota chyby v generaci
[val, ind] = min( gen( :, geb));     % index jedince s nejmenší chybou
x = X( ind, :);                     % parametry jedince s nejmenší chybou
```

Výsledné parametry-souřadnice uložíme pro lepší znázornění do proměnné x .

Následuje rození nové generace jedinců a to tolikrát, kolikrát jsme si na začátku programu zadali velikost populace-hodnoty G . Lze použít několik metod, zde použijeme dvě metody. Metodu `decimace` (`decim.m`) a porovnáme její výsledky s metodou vítězství v turnaji (`tour.m`). Obě metody používají ve výpočtech tzv. strategii elity, tzn. že nejlepší jedinec z každé generace automaticky postupuje do další generace nehlédíc na výsledek (jestli už v nové generaci je nebo není). V každé z metod je také zahrnuta pravděpodobnost křížení a pravděpodobnost mutace.

5 Porovnání výsledků

V této kapitole budou zobrazeny a ověřeny optimalizované směrové charakteristiky anténní soustavy letounu vypočtené vytvořeným kódem v programu Matlab volně dostupnými programy SuperNec a 4nec2. Pro dobré porovnání výsledků budou charakteristiky všech těchto tří programů zobrazeny v jednom grafu a zároveň s nimi zobrazena směrová charakteristika soustavy antén před její optimalizací. Charakteristiky budou vždy zobrazeny v horizontální rovině xy , $z=0$.

Zobrazíme směrové charakteristiky anténní soustavy optimalizované dvěma algoritmy. Prvním je metoda roje částic(PSO) a druhá metoda genetických algoritmů(GA). U tohoto algoritmu zhodnotíme dva způsoby rození nových jedinců. Použijeme metodu decimace populace a metodu vítězství v turnaji. Poté porovnáme mezi sebou optimalizaci metodou roje částic s optimalizací metodou genetických algoritmů a porovnáme způsoby rození nových jedinců u metody genetických algoritmů. Spolu s tím, bude zobrazeno rozmístění antén před a po optimalizaci, průběh kritériální funkce(závislost chybové funkce na počtu generací) a na závěr vyneseme do tabulky srovnání souřadnic jednotlivých antén před a po optimalizaci. Směrové charakteristiky porovnáme pro tři kmitočty 121,5 MHz, 243,0 MHz a 1030 MHz.

5.1 Soustava antén na kmitočtu 121,5 MHz

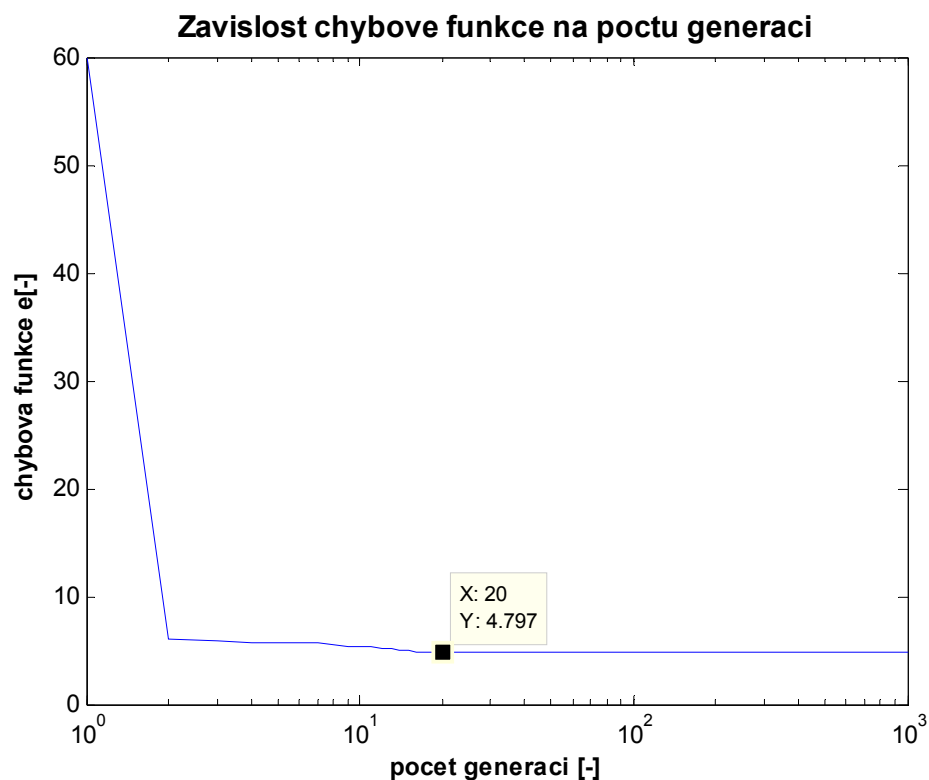
Pro obě optimalizace (PSO, GA) budou stejné některé vstupní parametry. Pro zjednodušení uvažujeme vertikální orientaci všech antén, délku dipólů 0,25 m a antény byly při výpočtu rozděleny na 100 segmentů. Směrové charakteristiky jsou vykresleny pro anténní řadu, sestávající z dvanácti dipólů umístěných v kartézském souřadném systému x , y , z podle tab.2. Horizontální směrová charakteristika je vykreslena pro úhly $\varphi=(0^\circ \text{ až } 360^\circ)$ s diskretizačním krokem $0,1^\circ$ a $\nu=90^\circ$.

Tab. 2 Souřadnice antén letounu VUT 100.

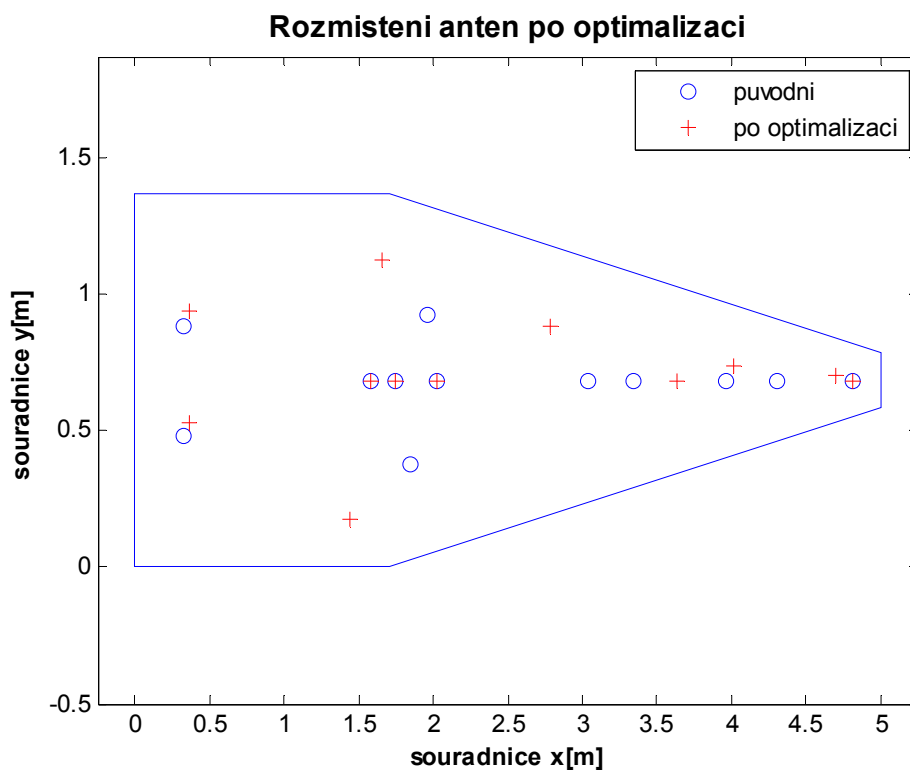
anténa	původní souřadnice		
	x[m]	y[m]	z[m]
DME	0,33	0,48	0,042
XPDR	0,33	0,886	0,042
COM2	1,846	0,374	0,04
TCAD bottom	1,96	0,926	0,055
ADF	3,34	0,686	0,24
MARKER	3,97	0,686	0,27
STORM SCOPE	4,81	0,686	0,34
GPS1	1,58	0,686	1,4
GPS2	1,74	0,686	1,4
TCAD top	2,03	0,686	1,4
ELT	3,035	0,686	1,15
COM1	4,3	0,686	1,01
VOR	5,91	0,686	1,91

5.1.1. Optimalizace metodou roje částic

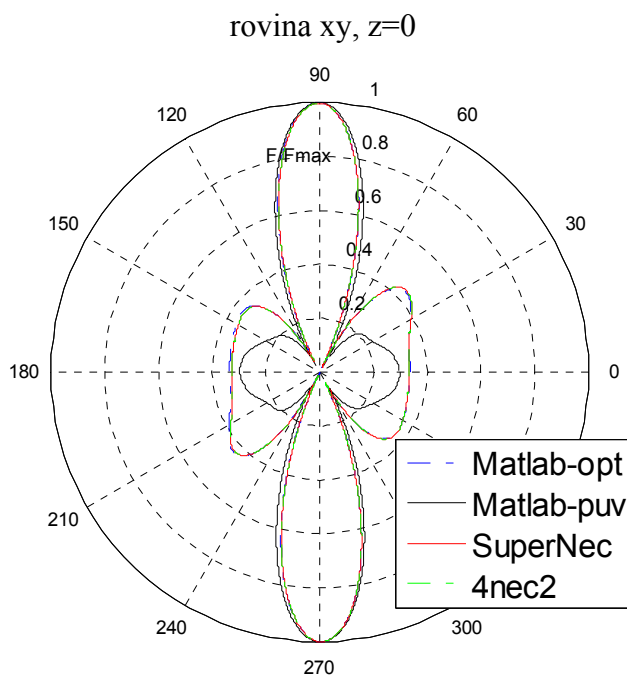
Dalšími vstupními parametry, které byly nastaveny při této optimalizaci jsou počet generací=1000, počet jedinců v generaci=40, časový krok $\Delta t=0,1s$, koeficienty c_1 a $c_2=1,49$.



Obr. 17. Průběh kritériální funkce u metody roje částic



Obr. 18. Uspořádání antén před a po optimalizaci

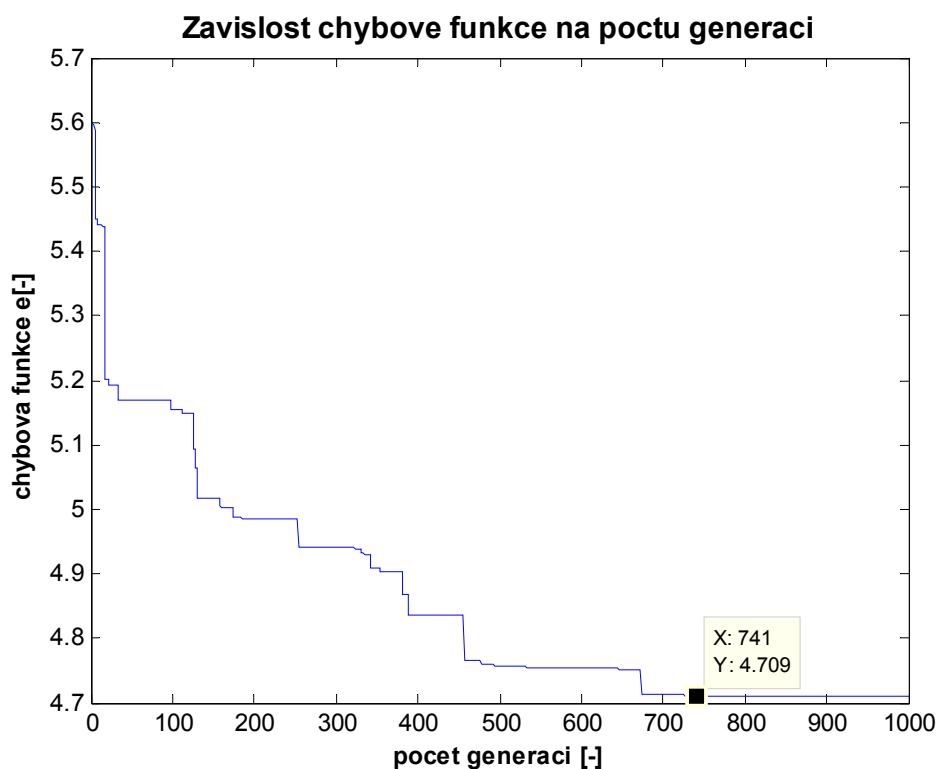


Obr. 19. Porovnání směrových charakteristik programů Matlab, SuperNec a 4nec2.

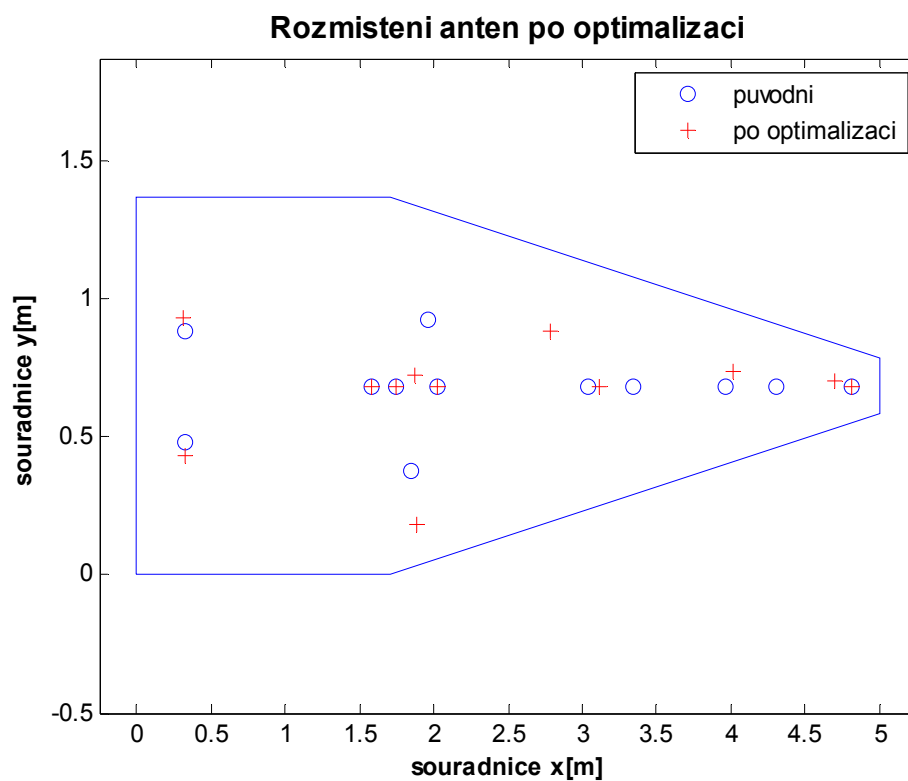
5.1.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů

Vstupní parametry, které byly nastaveny při této optimalizaci jsou počet generací=1000, počet jedinců v generaci=40, pravděpodobnost křížení 30% a pravděpodobnost mutace 10%.

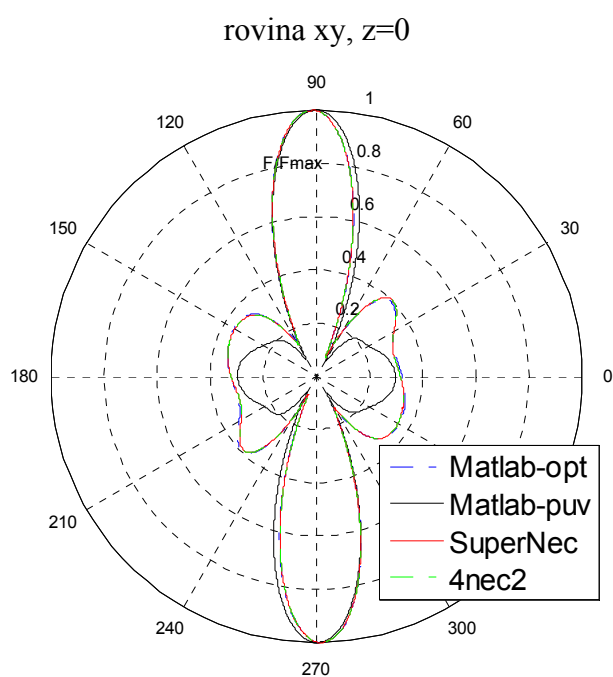
GA s rozením nových jedinců metodou decimace populace



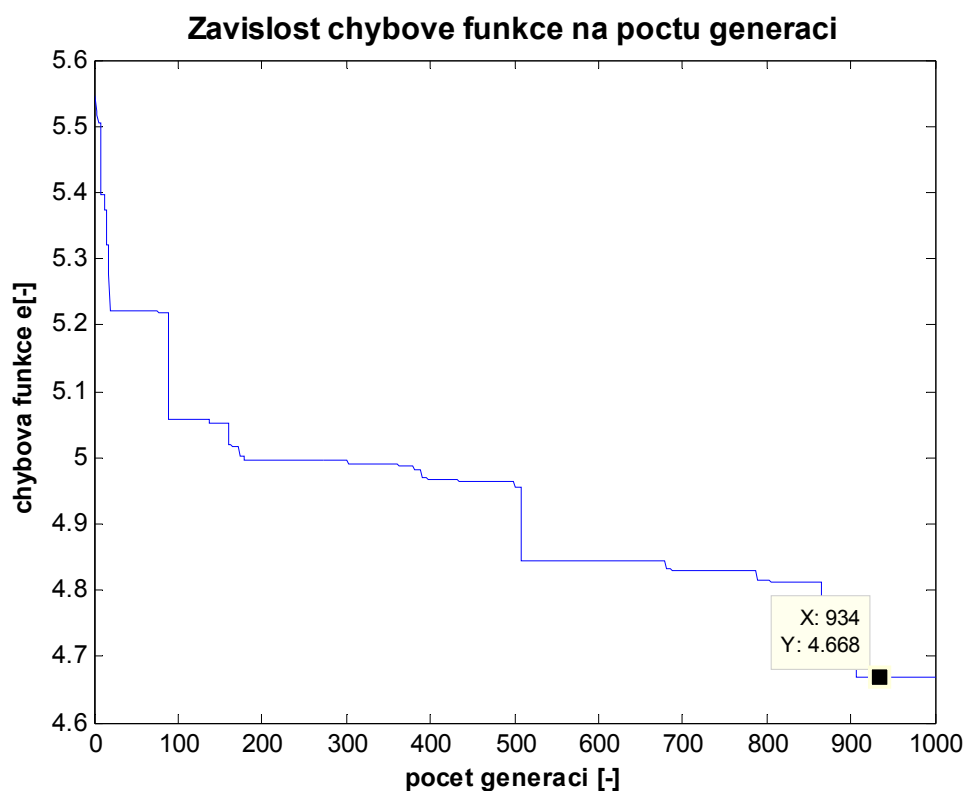
Obr. 20. Průběh kritériální funkce u metody GA s použitím selekce decimace populace



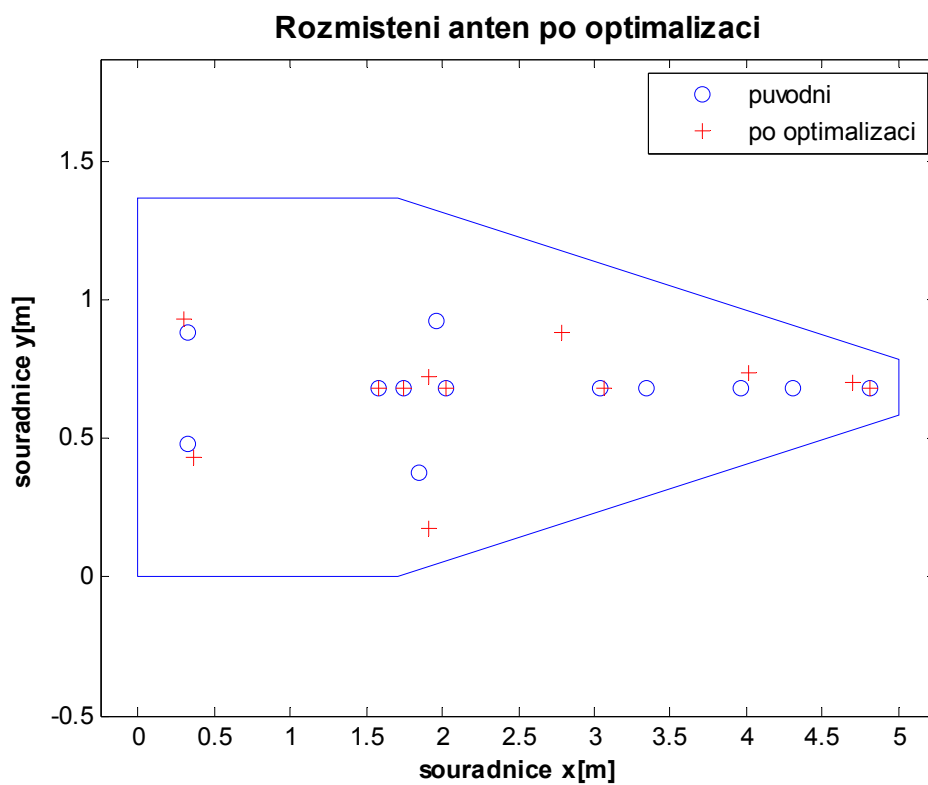
Obr. 21. *Uspořádání antén před a po optimalizaci*



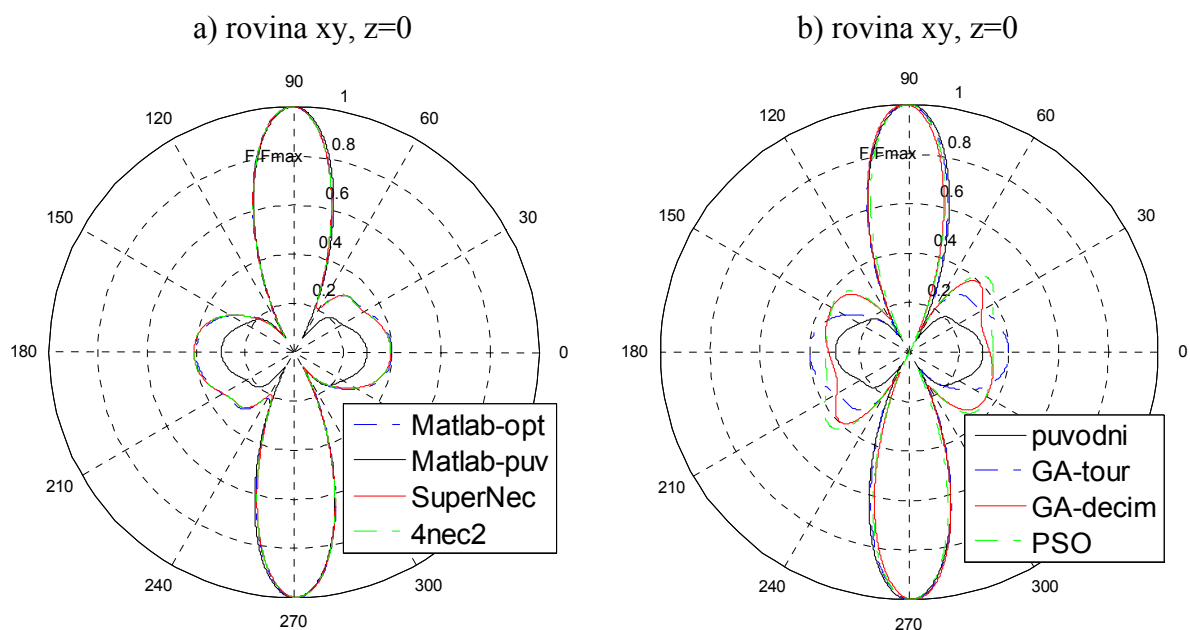
Obr. 22. *Porovnání směrových charakteristik programů Matlab, SuperNec a 4nec2.*



Obr. 23. Průběh kritériální funkce u metody GA s použitím selekce vítězství v turnaji



Obr. 24. Uspořádání antén před a po optimalizaci



Obr. 25. a) Porovnání směrových charakteristik programy Matlab, SuperNec a 4nec2, b) porovnání optimalizovaných směrových charakteristik metod PSO, GA-tour, GA-decim s původním neoptimalizovaným průběhem vypočítaných programem Matlab

Ve všech třech případech optimalizace PSO, GA-tour, GA-decim došlo ke zlepšení směrové charakteristiky jak demonstruje obr. 25b. Určit, která z těchto metod je však lepší je nejednoznačné. Zobrazené průběhy daných metod jsou navíc vybrány subjektivně (pohledem) z přibližně 20-ti optimalizačních procesů každé metody.

Směrová charakteristika optimalizovaného průběhu programu Matlab-opt byla ověřena programy SuperNec a 4nec2 např. jak demonstruje obr. 25a pro GA (vítězství v turnaji). Průběhy si velice přesně odpovídají u všech třech použitých optimalizací (obr. 19, obr. 22).

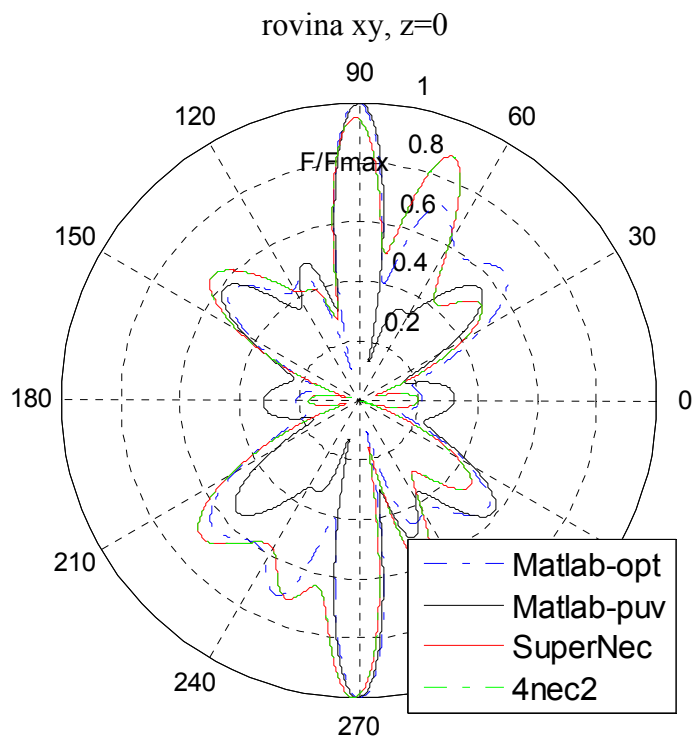
5.2. Soustava antén na kmitočtu 243 MHz

Na tomto kmitočtu budou už zobrazeny pouze směrové charakteristiky pro obě metody optimalizace. Průběhy kritériálních funkcí a rozmístění antén na letounu již nebudou uváděny, protože by to bylo zbytečné. Nastavení vstupních parametrů je u obou metod optimalizace stejné jako v předešlém samozřejmě až na kmitočet 243 MHz.

Při porovnávání optimalizovaného průběhu Matlab-opt s programy SuperNec a 4nec2 si lze všimnout částečné odchylky což u předchozího kmitočtu 121.5 MHz nebylo patrné. Tento rozdíl je způsoben rozdílnou metodou výpočtu mezi jednotlivými programy a uplatňuje se na vyšších kmitočtech nebo při zvyšujícím se počtu anténních prvků soustavy antén.

V našem případě, pomocí programu Matlab, využíváme analytického výpočtu směrových charakteristik a neuvažujeme vzájemné indukovaní proudu anténního prvku soustavy ostatními anténami. Tím nedochází k dalším součtům a odečtům směrových charakteristik a výsledná směrová charakteristika je vždy souměrná podle osy symetrie. Programy pro ověření průběhu pomocí programu Matlab, SuperNec a 4nec2 využívají momentové metody a indukovaní proudu jedné antény ostatními je zde uvažováno. Tím vzniká částečná chyba výpočtu a průběhy si proto v některých částech směrové charakteristiky přesně neodpovídají. Tuto vlastnost je možné vidět na následujících grafech. Zatímco průběhy programů SuperNec a 4nec2 si odpovídají, s programem Matlab se částečně odlišují.

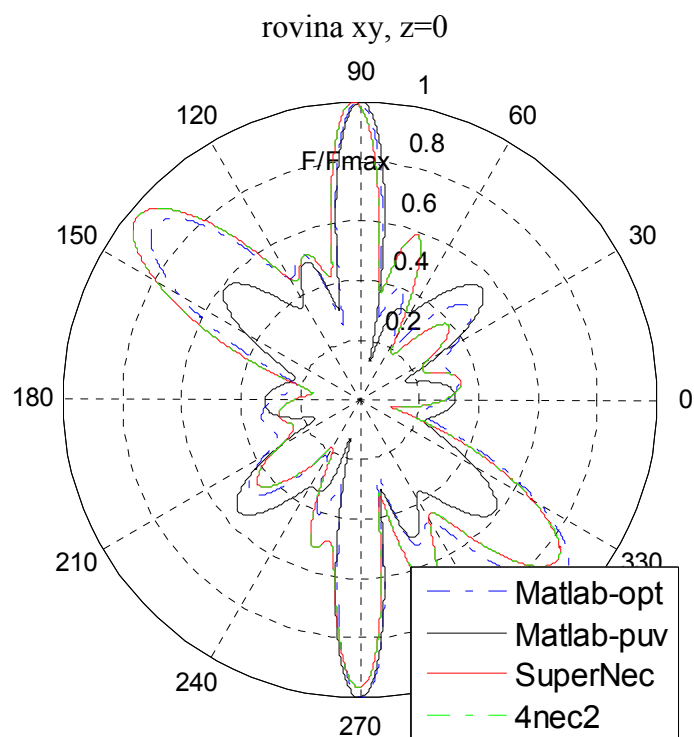
5.2.1. Optimalizace metodou roje částic



Obr. 26. Porovnání směrových charakteristik programy Matlab, SuperNec a 4nec2.

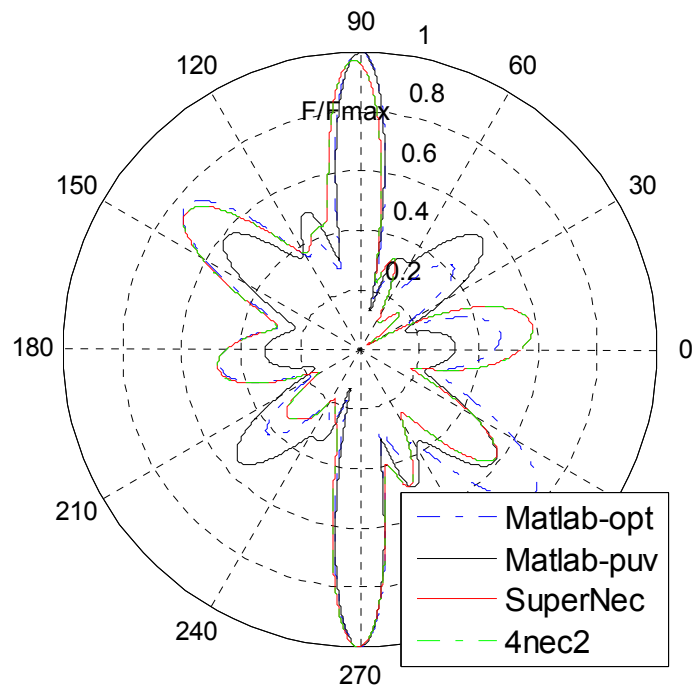
5.2.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů

GA s rozením nových jedinců metodou decimace populace

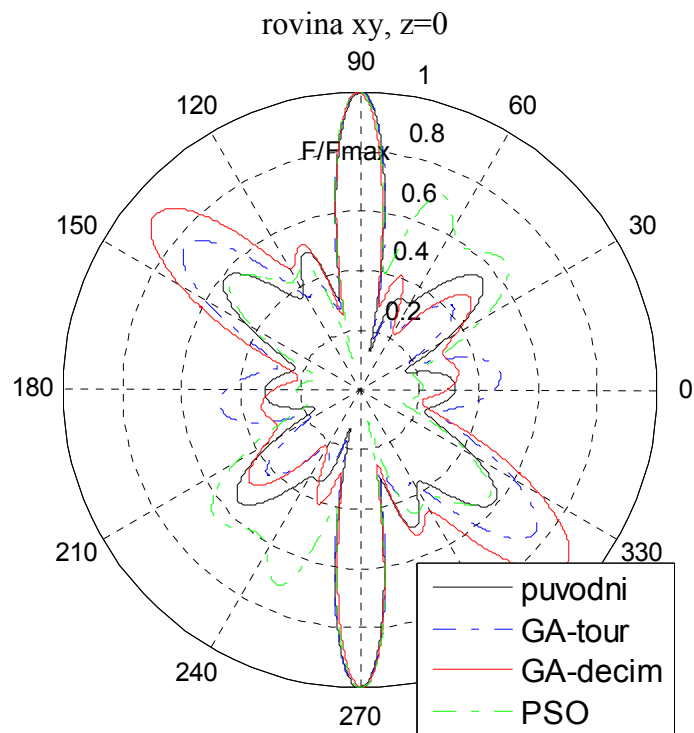


Obr. 27. Porovnání směrových charakteristik programy Matlab, SuperNec a 4nec2.
GA s rozením nových jedinců metodou vítězství v turnaji

rovina xy, $z=0$



Obr. 28. Porovnání směrových charakteristik programy Matlab, SuperNec a 4nec2.

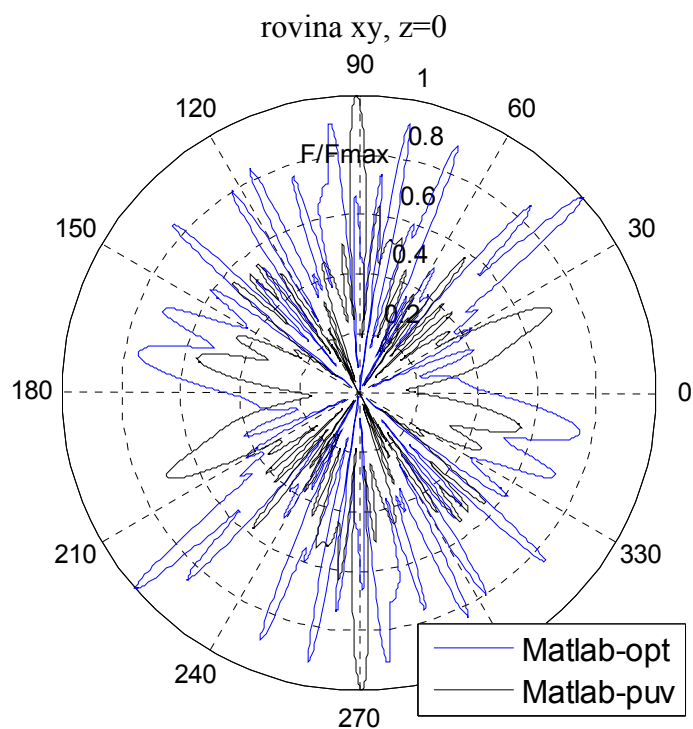


Obr. 29. Porovnání optimalizovaných směrových charakteristik metod PSO, GA-tour, GA-decim s původním neoptimalizovaným průběhem vypočítaných programem Matlab.

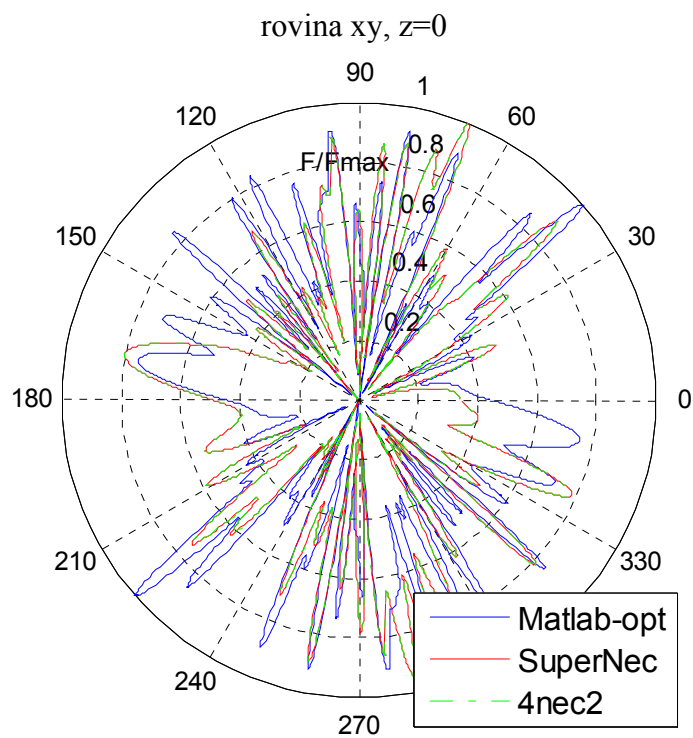
Na tomto kmitočtu došlo také ke zlepšení směrové charakteristiky ve všech případech optimalizací. Nejlepší směrovosti dosáhl zřejmě algoritmus GA-decim (červená charakteristika na obr. 29). PSO (zelená charakteristika) dosáhla oproti GA o něco horších výsledků, ovšem na úkor dosažení lepší směrovosti ve směru pootočeném o 90° .

5.3. Soustava antén na kmitočtu 1030MHz

5.3.1. Optimalizace metodou roje částic



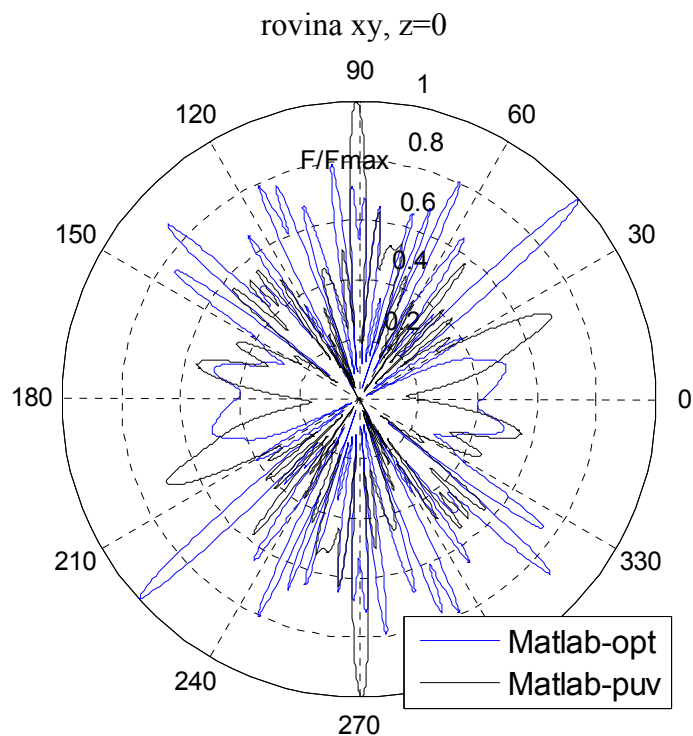
Obr. 30. Porovnání původní a optimalizované směrové charakteristiky vypočítané programem Matlab.



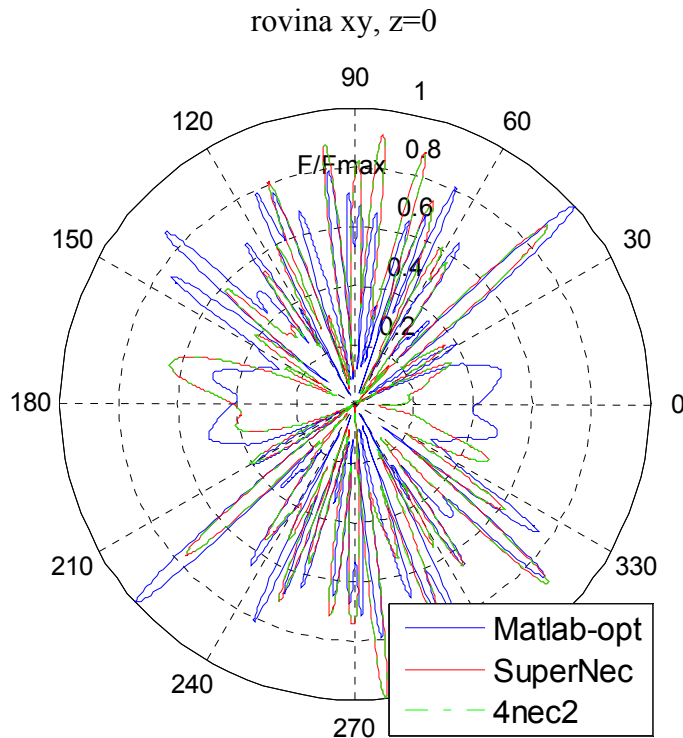
Obr. 31. Porovnání optimalizovaných směrových charakteristik vypočítané programy Matlab, SuperNec a 4nec2.

5.3.2. Optimalizace metodou genetických algoritmů

Rození nových jedinců metodou decimace populace

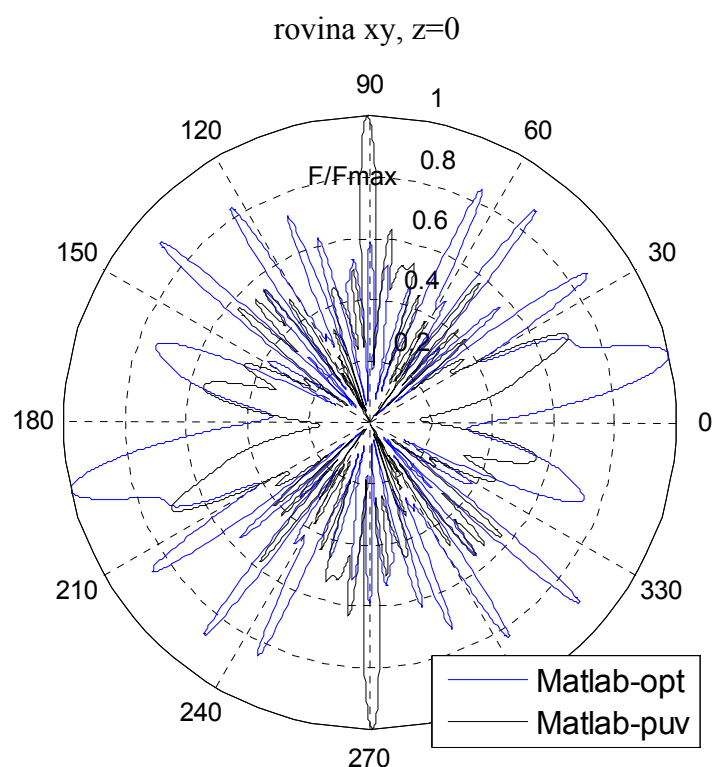


Obr. 32. Porovnání původní a optimalizované směrové charakteristiky vypočítané programem Matlab.

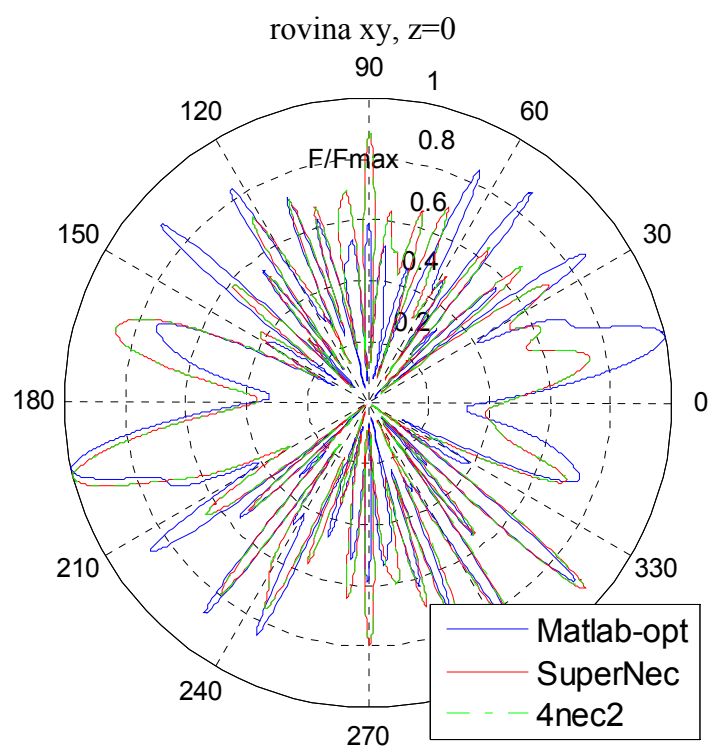


Obr. 33. Porovnání optimalizovaných směrových charakteristik vypočítané programy Matlab, SuperNec a 4nec2.

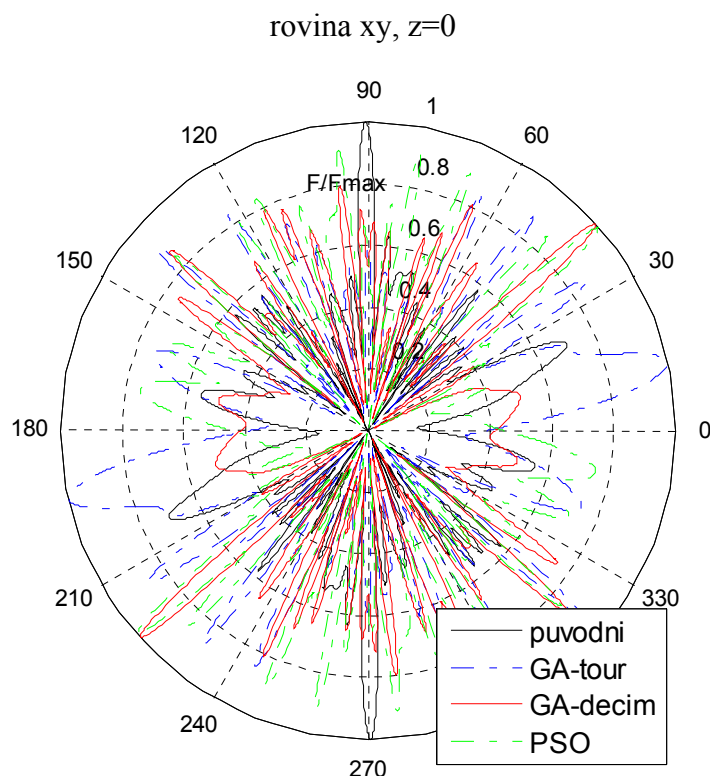
Rození nových jedinců metodou vítězství v turnaji



Obr. 34. Porovnání původní a optimalizované směrové charakteristiky vypočítané programem Matlab.



Obr. 35. Porovnání optimalizovaných směrových charakteristik vypočítané programy Matlab, SuperNec a 4nec2.



Obr. 36. Porovnání optimalizovaných směrových charakteristik metod PSO, GA-tour, GA-decim s původním neoptimalizovaným průběhem vypočítaných programem Matlab.

U výše zobrazených směrových charakteristik je vidět také částečné zlepšení mezi původní neoptimalizovanou směrovou charakteristikou a směrovými charakteristikami programů Matlab, SuperNec a 4nec2 po optimalizaci. Díky zvyšujícímu kmitočtu se navíc štější vyzařovací charakteristika jak je patrné z grafů výše.

Pro všechny tři uvažované kmitočty 121.5 MHz, 243 MHz a 1030 MHz mají optimalizované charakteristiky srovnáním na první pohled lepší směrové vlastnosti než před optimalizací. Na kmitočtu 121.5 MHz jsou navíc zobrazeny závislosti chybových funkcí na počtu generací a rozmístění antén, z níž je možné posoudit rozdíly umístění antén po optimalizaci. Pro lepší posouzení rozmístění antén jsou vypsány souřadnice pro tento kmitočet v tab. 3-8.

Rozmístění antén po optimalizaci pomocí metody roje částic

Tab. 3 Souřadnice antén po optimalizaci pomocí metody roje částic pro vrchní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
GPS1	1,58	0,686	1,4	1,58	0,686	1,4
GPS2	1,74	0,686	1,4	1,74	0,686	1,4
TCAD top	2,03	0,686	1,4	2,03	0,686	1,4
ELT	3,035	0,686	1,15	3,285	0,886	1,15
COM1	4,3	0,686	1,01	4,5443	0,706	1,01
VOR	5,91	0,686	1,91	5,91	0,686	1,91

Tab. 4 Souřadnice antén po optimalizaci pomocí metody roje částic pro spodní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
DME	0,33	0,48	0,042	0,36	0,53	0,042
XPDR	0,33	0,886	0,042	0,36	0,9239	0,042
COM2	1,846	0,374	0,04	1,446	0,174	0,04
TCAD bottom	1,96	0,926	0,055	1,56	1,126	0,055
ADF	3,34	0,686	0,24	3,64	0,686	0,24
MARKER	3,97	0,686	0,27	4,02	0,736	0,27
STORM SCOPE	4,81	0,686	0,34	4,81	0,686	0,34

Rozmístění antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(decimace populace)

Tab. 5 Souřadnice antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(selekce decimace populace) pro vrchní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
GPS1	1,58	0,686	1,4	1,58	0,686	1,4
GPS2	1,74	0,686	1,4	1,74	0,686	1,4
TCAD top	2,03	0,686	1,4	2,03	0,686	1,4
ELT	3,035	0,686	1,15	2,785	0,8844	1,15
COM1	4,3	0,686	1,01	4,6469	0,6668	1,01
VOR	5,91	0,686	1,91	5,91	0,686	1,91

Tab. 6 Souřadnice antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(selekce decimace populace) pro spodní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
DME	0,33	0,48	0,042	0,3595	0,4425	0,042
XPDR	0,33	0,886	0,042	0,3448	0,8981	0,042
COM2	1,846	0,374	0,04	1,596	0,174	0,04
TCAD bottom	1,96	0,926	0,055	1,5944	0,7276	0,055
ADF	3,34	0,686	0,24	3,6377	0,686	0,24
MARKER	3,97	0,686	0,27	4,0196	0,7356	0,27
STORM SCOPE	4,81	0,686	0,34	4,81	0,686	0,34

Rozmístění antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(vítězství v turnaji)

Tab. 7 *Souřadnice antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(selekce vítězství v turnaji) pro vrchní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.*

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
GPS1	1,58	0,686	1,4	1,58	0,686	1,4
GPS2	1,74	0,686	1,4	1,74	0,686	1,4
TCAD top	2,03	0,686	1,4	2,03	0,686	1,4
ELT	3,035	0,686	1,15	2,785	0,486	1,15
COM1	4,3	0,686	1,01	4,6469	0,698	1,01
VOR	5,91	0,686	1,91	5,91	0,686	1,91

Tab. 8 *Souřadnice antén po optimalizaci pomocí genetických algoritmů(selekce vítězství v turnaji) pro spodní část trupu letounu VUT100 na kmitočtu 121.5MHz.*

anténa	původní souřadnice			souřadnice po optimalizaci		
	x[m]	y[m]	z[m]	x _{opt} [m]	y _{opt} [m]	z _{opt} [m]
DME	0,33	0,48	0,042	0,3598	0,432	0,042
XPDR	0,33	0,886	0,042	0,3037	0,9356	0,042
COM2	1,846	0,374	0,04	1,8929	0,1896	0,04
TCAD bottom	1,96	0,926	0,055	1,9569	0,7822	0,055
ADF	3,34	0,686	0,24	3,04	0,686	0,24
MARKER	3,97	0,686	0,27	4,0134	0,686	0,27
STORM SCOPE	4,81	0,686	0,34	4,81	0,686	0,34

Měněny byly souřadnice s přihlédnutím k požadavkům výrobce jen u osmi antén(ELT, COM1, DME, XPDR, COM2, TCAD bottom, ADF, MARKER). Zbývajících pět antén (GPS1, GPS2, TCAD top, VOR, STORM SCOPE) zůstali v původním umístění.

Největší „volnost pohybu“ měla anténa COM1, COM2 a TCAD bottom v rozmezí $\pm 40\text{cm}$ od původní polohy v ose x a $\pm 20\text{cm}$ v ose y. Antény ELF a ADF v rozmezí hodnot $\pm 25\text{cm}$ v ose x, v ose y pak ELT $\pm 2\text{cm}$ a ADF $\pm 0\text{cm}$. Ostatní antény jejíž souřadnice byly měněny dosahovaly změn souřadnic přibližně $\pm 2\text{cm}$ oproti původní poloze v obou osách x, y.

6 Závěr

Cílem této práce bylo prostudovat parametry antén, kterými je vybaven letoun VUT 100, antény rozdělit podle kmitočtových pásem, v nichž pracují, a podle jejich polarizace. Tyto údaje jsou uvedeny v tabulce 1. Dalším cílem bylo vytvořit kód programu v prostředí MATLAB, který počítá směrové charakteristiky antén v závislosti na kmitočtu a na umístění jednotlivých antén na trupu letounu a tyto směrové charakteristiky optimalizovat z hlediska větší směrovosti v horizontální rovině.

Nejdříve byla modelována obecně orientovaná anténa, jejíž funkce záření měla vektorovou formu výpočtu. Byly modelovány a zobrazeny směrové charakteristiky v polárních a kartézských souřadnicích pro umístění dipólu do os x , y , z a zobrazeny funkce záření v příslušných rovinách. Výsledný program na vzájemné působení antén byl složen z výpočtů funkcí záření dvou obecně orientovaných vodičů (umístěny byly rovnoběžně s osou y), jejichž složky funkce záření byly poté sečteny. Jak se však ukázalo, tato metoda výpočtu funkce záření nedává přesné výsledky, a proto bylo od této metody v dalším upuštěno.

Jako vhodná metoda výpočtu funkce záření anténní soustavy se ukázala být metoda výpočtu pomocí skalárního vztahu. Program `radiation.m`, který byl napsán pro výpočet funkce záření soustavy antén umožňuje natočit jednotlivé antény libovolně v prostoru, zadat libovolnou délku, polohu každého dipólu a lze vybrat výpočet směrových charakteristik z rovin xy , xz a yz .

Příkladem výpočtu zde byla soustava dvou antén. Následně byla tato metoda použita pro výpočet skupinové funkce záření dvanácti antén letounu na kmitočtech 121.5MHz, 243MHz a 1030MHz. Výsledky programu Matlab byly ověřeny dvěma komerčními programy (SuperNec, 4nec2). Na kmitočtu 121.5 MHz nebyly mezi simulacemi v jednotlivých softwarech žádné rozdíly. Na kmitočtech 243 MHz a 1030 MHz však výsledky již rozdíly vykazovaly. Odchylky směrových charakteristik daných softwarů lze vidět v grafech výše. Jsou zřejmě způsobeny rozdílnou metodou používanou pro samostatný výpočet, když v našem případě neuvažujeme indukování proudu v anténách od dalších antén v soustavě.

Tato soustava dvanácti antén byla optimalizována dvěma algoritmy – metodou roje částic (PSO) a genetickými algoritmy (GA). Snahou bylo optimalizovat rozmístění jednotlivých antén soustavy tak, aby měla výsledná směrová charakteristika v horizontální rovině všesměrovější vlastnosti. U všech třech uvažovaných kmitočtů se nám tohoto podařilo dosáhnout. Doba výpočtu pro obě optimalizační metody trvala při počtu 1000 generací a 40 jedinců přibližně 72s. Spolu se směrovými charakteristikami byla zobrazena na kmitočtu 121,5 MHz ještě závislost chybové funkce na počtu generací a rozmístění antén na trupu letounu před a po optimalizaci. Nejmenší hodnotu chybové funkce na kmitočtu 121,5 MHz měla optimalizace genetických algoritmů s rozením nových jedinců pomocí vítězství v turnaji a to 4,668. Metoda roje částic měla chybovou funkci rovna 4,797 a na obr. 17 je možné vidět jak metoda rychle konverguje. Tato metoda má občas tendenci sklouznout do lokálního extrému. Genetické algoritmy s rozením nových jedinců pomocí decimace populace měla velikost chybové funkce 4,709. Z tohoto pohledu má nejlepší optimalizační vlastnosti metoda GA s rozením nových jedinců pomocí vítězství v turnaji. Nelze to však považovat za pravidlo. Pro posouzení, která optimalizace je lepší by musela být provedena řada pokusů a měření přímo na letounu a jednotlivé optimalizace by musely být prozkoumány více podrobně.

Literatura

- [1] NOVÁČEK, Z. *Elektromagnetické vlny, antény a vedení*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 2002.
- [2] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, Z. *Antény a šíření radiových vln*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 2005.
- [3] MICHALOVIČ, L. Optimalizace rozmístění antén na malém letounu. Diplomová práce. Brno: FEKT VUT v Brně, 2007.
- [4] ČERNOHORSKÝ, D., NOVÁČEK, D., RAIDA, Z. *Elektromagnetické vlny a vedení: příklady pro cvičení a domácí úkoly*. Skriptum FEKT VUT v Brně. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 1999.
- [5] ČECHOVÁ, M., VYŠÍN, I. *Teorie elektromagnetického pole*. Skriptum VUP v Olomouci. Olomouc: Nakladatelství VUP, 1992.
- [6] PROKOP, J., VOKURKA, J. *Šíření elektromagnetických vln a antény*. Praha: Nakladatelství SNTL, 1980.
- [7] ČESKÝ, T. *Antény pro příjem televize*. Praha: Nakladatelství SNTL, 1987.
- [8] ČERNOHORSKÝ, D., RAIDA, Z., ŠKVOR, Z., NOVÁČEK, Z. *Analýza a optimalizace mikrovlnných struktur*. Brno: Nakladatelství VUTIAM, 1999.
- [9] BARTSCH, H. J., *Matematické vzorce*. Praha 5: Nakladatelství MLADÁ FRONTA, 2002.
- [10] HOLLAND, J. H., *Adaption in Natural and Adaption Systems*. University of Michigan Press, Ann Arbor, 1975.
- [11] ROBINSON, J., RAHMAT-SAMII, Y. *Particle swarm optimization in electromagnetics*, IEEE Transactions on Antennas and Propagation. 2004, vol. 52, no. 2, p. 397-407.
- [12] HOLUBEC, B., *Použití PSO metody pro selekci příznaků : diplomová práce*. Praha: ČVUT Fakulta elektrotechnická. 2008. 65s. Dostupné z WWW: <https://dip.felk.cvut.cz/browse/pdfcache/holubb1_2008dipl.pdf>
- [13] ČAPEK, M., HAZDRA, P., *PSO optimalizace v Matlabu*. Praha: ČVUT FEL. 11s. Dostupné z WWW: <http://dsp.vscht.cz/konference_matlab/MATLAB08/prispevky/018_capek.pdf>
- [14] SOPHACLES, J. O., *Electromagnetic Waves and Antennas* [online]. New York. ECE Department Rutgers University. 2002 [cit. 14. února 2008]. Dostupné z WWW: <<http://www.ece.rutgers.edu/~orfanidi/ewa/>>.
- [15] Software SuperNec. Dostupné na: <<http://www.supernec.com/downloads.htm>>.
- [16] VOORS, A., *NEC based antenna modeler and optimizer*. 2005[cit. 9. dubna 2009]. Dostupné na WWW: <<http://home.ict.nl/~arivoors/>>.

Seznam použitých zkratk a symbolů

ACO (*Ant-Colony Optimization*) – metoda společenství mravenců

ADF (*Automatic Direction Finder*) – Radiokompas

DE (*Differential Evolution*) – diferenciální evoluce

DME (*Distance Measuring Equipment*) – Dálkoměrný systém

GA (*Genetic Algorithms*) – Genetické algoritmy

GPS (*Global Positioning System*) – Družicový navigační systém

LOC (*Localizer*) – Kurzový maják ILS, koriguje letadlo pouze horizontálně

NDB (*Non-Directional Beacon*) – Navigační systém složený ze sítě nesměrových majáků

PSO (*Particle Swarm Optimization*) – Metoda roje částic

SOMA (*Self-Organizing Migrating Algorithm*) samo-organizující se migrační algoritmus

VOR (*VHF Omni-directional Range*) – Navigační systém složený ze sítě všesměrových radiomajáků

TCAS (*Traffic Alert and Collision Avoidance System*) – Varovný protisrážkový systém

TRPD (*Transponder*) – Odpovídač

VHF (*Very High Frequency*) – Velmi krátké vlny (30 – 300MHz)